



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

Calibración de una herramienta informática de control de compuertas en un canal para sistemas de riego

Autor

Úrbez Ayneto Izquierdo

Directores

Pilar Brufau García  
Asier Lacasta Soto

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
Año 2016

# **CALIBRACIÓN DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA DE CONTROL DE COMPUERTAS EN UN CANAL PARA SISTEMAS DE RIEGO**

## **RESUMEN**

---

En nuestro país el mayor consumidor de agua dulce es el regadío. Con más de 3,2 millones de hectáreas de superficie regada su consumo está por encima del 80% de la demanda total de los recursos hídricos. En la actualidad se ha alcanzado ya una plena conciencia del problema vital que representa tratar el agua como un elemento de gran valor. En el ámbito del consumo humano se establecen campañas de orientación al ahorro. Las nuevas instalaciones y redes se construyen con este objetivo y las antiguas se adaptan con el mismo fin en el llamado plan de modernización de regadíos. Parece lógico plantear que cualquier metodología aplicada a optimizar los consumos es fundamental por el gran peso en demanda sobre el total de los recursos hídricos que este sector exige.

La investigación y la puesta en marcha en la vida real, en el campo del riego a través de redes de canales, están progresando en la implementación de elementos de control que permitan reducir la mano de obra necesaria para la regulación y aumentar la calidad de servicio. Se requiere una modernización que incluya la automatización de los canales a fin de minimizar las pérdidas generadas en el transporte y distribución de agua, consiguiendo optimizar el uso de este bien escaso. Con el objetivo fundamental puesto en conseguir una herramienta computacional que gestione adecuadamente el control de compuertas se ha realizado este trabajo.

En el proyecto se va a calibrar y validar una herramienta de simulación numérica desarrollada por el grupo de Hidráulica Computacional de la Universidad de Zaragoza (<http://ghc.unizar.es>) para gestionar el control de compuertas en redes de riego de canales. El correcto funcionamiento de las estructuras de control de los canales es un problema abierto después de décadas de investigación y desarrollo en el que se busca una metodología robusta y eficiente para el control óptimo, rápido y fiable. Para ello se han diseñado casos test adecuados desde el nivel más sencillo al más complejo que servirán de base de la calibración y a la vez se analiza la sensibilidad de los parámetros de simulación. Finalmente todo lo aprendido se aplica a un caso real complejo como es el canal de Pina de Ebro de aproximadamente 12 km de longitud que contiene 4 compuertas transversales y 19 tomas laterales.



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. Úrbez Ayneto Izquierdo,

con nº de DNI 76972075-E en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)  
Grado \_\_\_\_\_, (Título del Trabajo)

Calibración de una herramienta informática de control de compuertas en un canal para sistemas de riego

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, a 4 de febrero de 2016 \_\_\_\_\_

Fdo: Úrbez Ayneto Izquierdo

# ÍNDICE

---

1	Introducción.....	8
2	Breve resumen histórico de la evolución del riego en la agricultura.....	12
3	Estado actual del riego en la agricultura.....	14
4	Regulación automática en sistemas de riego.....	16
5	Algoritmos de control de compuertas en canales.....	20
6	Herramienta de simulación hidráulica: Canalfowmodel.....	22
7	Resultados numéricos.....	24
7.1	Sensibilidad de un canal trapezoidal con una compuerta transversal ante diferentes perturbaciones.....	24
7.1.1	Análisis de sensibilidad de los parámetros de simulación del controlador PID de la compuerta.....	27
7.2	Canal de anchura variable, sección trapezoidal y pendiente fuerte con 7 compuertas transversales y 8 tomas laterales.....	31
7.3	Canal de riego de Pina de Ebro.....	35
8	Conclusiones.....	41
	Bibliografía.....	43
	Índice de figuras.....	44
	Índice de tablas.....	52

## **ANEXO I** Canalfowmodel

1	Introducción.....	55
2	PASO I: PRE-PROCESO.....	56
2.1	Geometría.....	56
2.2	Condiciones iniciales.....	58
2.3	Condiciones de contorno.....	59
2.4	Compuertas laterales.....	60
2.5	Compuertas transversales.....	61
2.6	Parámetros de simulación.....	62
3	PASO II: CÁLCULO.....	64
4	PASO III: POSTPROCESO.....	65

## **ANEXO II** Resultados numéricos de las simulaciones computacionales

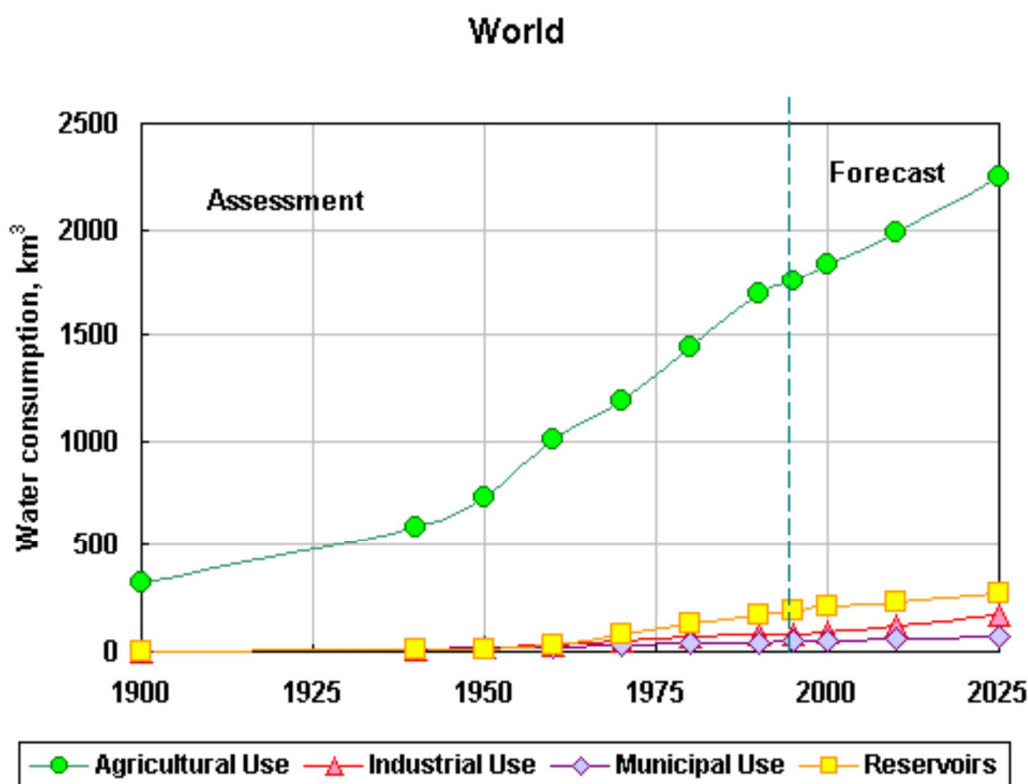
Introducción.....	68
Tests académicos	
1 CASO 1: Canal recto de sección rectangular y caudal de entrada constante .....	70
1.1 Geometría.....	70
1.2 Condiciones Iniciales.....	71
1.3 Condiciones de Contorno.....	72
1.4 Resultado de la simulación.....	73
2 CASO 2: Evolución del hidrograma triangular de caudal de entrada de un canal recto de sección rectangular .....	74
2.1 Geometría.....	74
2.2 Condiciones Iniciales.....	74
2.3 Condiciones de Contorno.....	75
2.4 Resultado de la simulación.....	76
3 CASO 3: Control aguas arriba de una compuerta transversal en un canal recto de sección trapezoidal.....	78
3.1 Geometría.....	78
3.2 Condiciones Iniciales.....	79
3.3 Condiciones de Contorno.....	80
3.4 Compuerta.....	81
3.5 Especificaciones para el control.....	81
3.6 Resultado de la simulación.....	82
3.7 Influencia de la perturbación.....	85
3.8 Análisis de sensibilidad de los parámetros de simulación del controlador PID de la compuerta.....	86
4 CASO 4: Control aguas arriba de dos compuertas transversales en un canal recto de sección trapezoidal .....	90
4.1 Geometría.....	90
4.2 Condiciones Iniciales.....	91
4.3 Condiciones de Contorno.....	91
4.4 Compuertas.....	92
4.5 Especificaciones para el control.....	92
4.6 Resultado de la simulación.....	93

5 CASO 5: Control aguas arriba de dos compuertas transversales y una toma lateral en un canal recto de sección trapezoidal.....	96
5.1 Geometría.....	97
5.2 Condiciones Iniciales.....	97
5.3 Condiciones de Contorno.....	97
5.4 Compuertas.....	98
5.5 Especificaciones para el control.....	98
5.6 Resultado de la simulación.....	99
Tests de referencia	
6 CASO 6: Canal de anchura variable, sección trapezoidal, con pendiente fuerte.....	104
6.1 Test 1.....	104
6.1.1 Geometría.....	104
6.1.2 Condiciones Iniciales.....	106
6.1.3 Condiciones de Contorno.....	106
6.1.4 Compuertas.....	107
6.1.5 Especificaciones para el control.....	111
6.1.6 Extracciones de caudal en las tomas laterales.....	112
6.1.7 Resultado de la simulación.....	114
6.2 Test 2.....	128
6.2.1 Geometría.....	128
6.2.2 Condiciones Iniciales.....	128
6.2.3 Condiciones de Contorno.....	128
6.2.4 Compuertas.....	129
6.2.5 Especificaciones para el control.....	131
6.2.6 Extracciones de caudal en las tomas laterales.....	131
6.2.7 Resultado de la simulación.....	133
7 CASO 7: Canal de anchura variable, sección trapezoidal, con pendiente suave.....	145
7.1 Test 1.....	145
7.1.1 Geometría.....	145
7.1.2 Condiciones Iniciales.....	147
7.1.3 Condiciones de Contorno.....	147
7.1.4 Compuertas.....	148
7.1.5 Especificaciones para el control.....	151

7.1.6	Extracciones de caudal en las tomas laterales .....	152
7.1.7	Resultado de la simulación .....	154
7.2	Test 2.....	165
7.2.1	Geometría .....	165
7.2.2	Condiciones Iniciales .....	165
7.2.3	Condiciones de Contorno.....	165
7.2.4	Compuertas.....	166
7.2.5	Especificaciones para el control .....	168
7.2.6	Extracciones de caudal en las tomas laterales .....	168
7.2.7	Resultado de la simulación .....	170
<b>Aplicación a un caso real</b>		
8	<b>CASO 8: Canal de riego de Pina de Ebro.....</b>	<b>182</b>
8.1	Geometría.....	185
8.2	Condiciones Iniciales.....	186
8.3	Condiciones de Contorno.....	186
8.4	Compuertas.....	187
8.5	Especificaciones para el control.....	192
8.6	Extracciones de caudal en las tomas laterales.....	193
8.7	Resultado de la simulación.....	195

# 1 INTRODUCCIÓN

En la agricultura, el uso de los sistemas de riego ha permitido un aumento de las producciones agrícolas. En España, la agricultura de regadío ocupa un 15% de la superficie agrícola útil, produciendo un 55% del producto final. Este aumento en la producción se debe a que la agricultura de regadío permite reducir las variaciones de la disponibilidad de agua causadas por la variabilidad meteorológica. La demanda de agua para riego se caracteriza por su gran volumen y su concentración en los meses más secos del año, lo que obliga a regular y movilizar grandes cantidades de agua. Se trata del uso de agua con mayor demanda en todo el mundo, representando aproximadamente el 80% del consumo mundial de agua, y como se puede observar en la *Figura 1.1*, con una tendencia creciente.



*Figura 1.1 Evolución del consumo de agua mundial según su uso: agricultura, industria, municipal, embalses.*  
Fuente: State Hydrological Institute (St.-Petersburg, Russia)

En el caso de España, la demanda hídrica para riego sigue la misma tendencia que ocurre en todo el mundo, lo cual puede llegar a suponer un problema cuando no se dispone de la cantidad necesaria. La *Tabla 1.1* muestra las demandas de agua agrupadas por cuencas, indicando el valor total de la demanda, el % que representa del total y la dotación media anual. Según los Planes Hidrológicos realizados por cada uno de los organismos de



cuenca en España, la demanda hídrica futura también va a sufrir un aumento considerable, equiparable al previsto en los estudios realizados a escala mundial.

Ámbito	Demandas de regadío (hm <sup>3</sup> /año)	Demandas de regadío (%)	Dotación media (m <sup>3</sup> /ha/año)
Norte (I, II y III)	532	2	7.589
Duero	3.603	15	6.547
Tajo	1.875	8	8.127
Guadiana (I y II)	2.285	9	6.701
Guadalquivir	3.140	13	6.499
Sur	1.070	4	6.704
Segura	1.639	7	6.162
Júcar	2.284	9	6.173
Ebro	6.310	26	8.049
C. I. Cataluña	371	2	5.752
Galicia Costa	532	2	8.337
Península	23.641	98	6.988
Baleares	189	1	7.862
Canarias	264	1	8.800
España	24.094	100	7.010

*Tabla 1.1 Demandas de riego en España agrupadas por cuencas. Fuente: Libro Blanco del Agua*

La *Figura 1.2* muestra las previsiones realizadas sobre la demanda de riego en España según las cuencas en dos horizontes futuros a 10 (primer horizonte) y 20 años (segundo horizonte) respecto al estado actual.

La demanda de agua de los agricultores requiere precisión en cantidad, frecuencia, duración y oportunidad en el reparto de la misma y por ello se hace necesario desarrollar sistemas de gestión eficientes; siendo la red de canales la infraestructura de conducción y distribución que más se usa en la agricultura.

El único problema de los sistemas de riego no es la gran demanda de agua, sino la baja eficiencia en su conducción y distribución. La antigüedad de la mayoría de infraestructuras que forman parte de las redes de distribución es una de las principales causas de pérdida de agua. Por ello se necesita la reparación y modernización de las redes, que se está llevando a cabo en el plan de modernización de riegos. Otro gran problema de los sistemas de riego es su gestión; las redes de distribución están formadas por canales sobredimensionados, en los que se generan grandes pérdidas de agua debido a excedentes en el agua demandada.

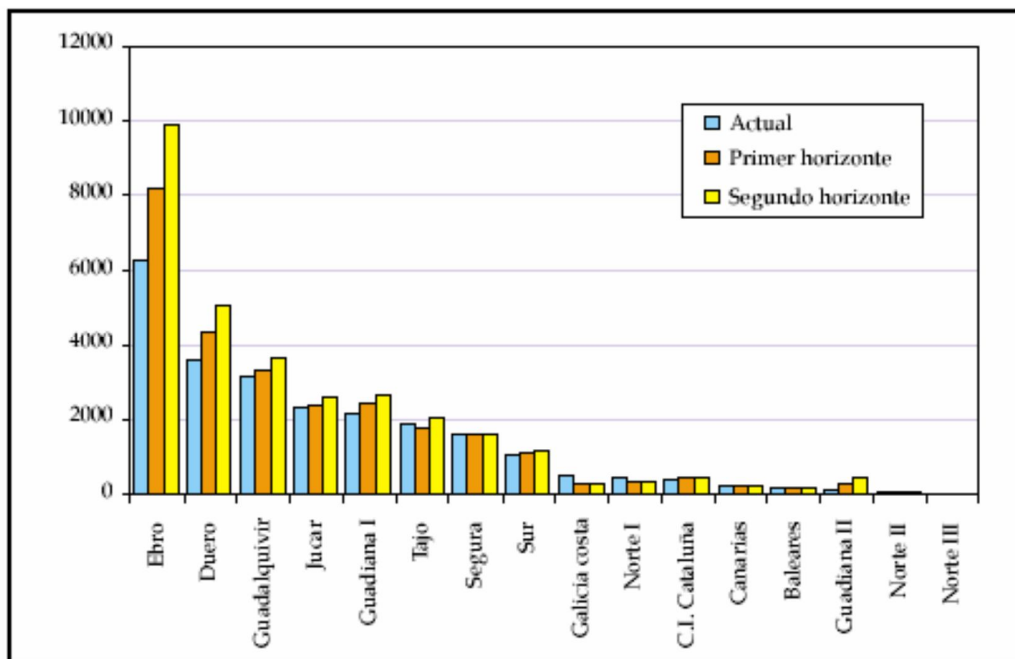


Figura 1.2 Previsiones sobre la demanda de riego en las cuencas españolas en dos horizontes futuros a 10 y 20 años. Fuente: Libro Blanco del Agua

La gestión en los sistemas de riego ha consistido durante muchos años en la regulación manual de las compuertas. Este tipo de control sólo tiene en cuenta el estado del canal en base a datos locales próximos al controlador, desaprovechando el recurso sobredimensionando la oferta para evitar imprevistos. Habitualmente, las estructuras de control se colocan en lugares inadecuados y la operación resulta irregular y fuera de tiempo. Los errores que se tienen junto a las pérdidas por infiltración reducen claramente la eficiencia del transporte y la distribución del agua en los canales. Esta situación va en detrimento de los agricultores, los cuales acaban teniendo bajas producciones, insatisfacción y falta de sensibilidad por el medio ambiente, lo cual da lugar a inundaciones del campo y problemas de salinización del suelo. Con la implantación de instrumentación, medida en tiempo real de calados, velocidades y caudales en determinados puntos del canal, y de compuertas automáticas se mejora esta situación. Así se puede conocer en tiempo real el estado del canal y mantener un nivel constante en las proximidades de cada una de las compuertas (aguas abajo y/o aguas arriba). Este control tiene la característica de que es local y no tiene en cuenta el resto de tramos o compuertas en el que todos los elementos participan. Otra alternativa, sobre la que se han centrado las investigaciones durante los últimos años, son los sistemas de control automático. El creciente uso de la automatización para gestionar eficientemente los sistemas de riego contribuye a poder alcanzar objetivos de tipo medioambiental, económico y social.

El objetivo principal de este proyecto se centra en esta última vía calibrando una herramienta computacional de control óptimo de un canal mediante una estrategia global, teniendo en cuenta la situación de cada uno de los tramos y elementos que forman parte

de la red de distribución. La automatización y la gestión eficiente del agua de riego permite contribuir en:

- El uso sostenible de los recursos hídricos limitados.
- La mejora en el abastecimiento de agua con niveles de calidad y presión adecuados.
- La gestión de canales dedicados al regadío.
- La supervisión y control de ríos para alerta hidrológica y prevención de inundaciones.

Entre los sistemas susceptibles de ser automatizados se encuentran:

- Las fuentes: ríos, embalses, canales, etc.
- Los sistemas de producción o tratamiento de las aguas.
- Los sistemas de transporte y de riego, que utilizan canalizaciones naturales o canales en lámina libre para conducir el agua

## 2 BREVE RESUMEN HISTÓRICO DE LA EVOLUCIÓN DEL RIEGO EN LA AGRICULTURA

---

Los primeros registros del riego en agricultura se remontan al año 6.000 a.C. en Egipto y en Mesopotamia (Irak e Irán en la actualidad), cuyos pobladores utilizaban los patrones de riada del Nilo o del Tigris y Éufrates, respectivamente. Las inundaciones que ocurrían de julio a diciembre, eran desviadas hacia los campos durante unos 40 o 60 días. Luego se drenaba el agua hacia el río en el momento preciso del ciclo de cultivo. En el año 3500 a.C. se empieza a utilizar el nilómetro, una medida del nivel de agua del río Nilo. Este indicador de inundación consistía en una columna vertical sumergida en el río con marcas de profundidad, en intervalos. Un segundo diseño consistiría en una serie de escaleras descendiendo en el río. Cuatro siglos después, en la primera dinastía de Egipto, se construyó el primer proyecto de riego a gran escala, bajo el reinado del rey Menes. Se utilizaron presas y canales para dirigir las aguas de inundación del Nilo hacia el lago Moeris. Sería ya un milenio más tarde cuando aparecieron las tuberías de cemento y de roca molida. Los famosos acueductos, una invención construida por los ingenieros romanos, permitían transportar el agua salvando los desniveles del terreno como el acueducto de Segovia que se puede observar en la *Figura 2.1*.



*Figura 2.1 Acueducto de Segovia*

El rey babilónico Hamurabi, autor del famoso código jurídico, fue quien elaboró las primeras regulaciones sobre el agua. Tenía en consideración la distribución del agua de una manera proporcional, en base a la superficie labrada. También se transmitía la responsabilidad al agricultor de realizar mantenimiento de los canales de su propiedad, así como la administración colectiva del canal por parte de todos sus usuarios. En este punto de la historia, el desarrollo agrícola radicaba en una serie de técnicas para manejar el agua de riego a través de los sistemas de distribución y en la construcción de terrazas de cultivo. Se desarrollaban tecnologías enfocadas a mitigar los efectos de la erosión, aminorar las inundaciones, retener la humedad, y permitir captaciones, traslados y almacenamientos.

Por otro lado, en la cultura azteca, destacó el conocido como cultivo por chinampas, que consistía en una construcción de campos elevados dentro de una red de canales dragados sobre el lecho del lago. Así se reciclaban los nutrientes arrastrados por las lluvias. Los Mayas, que estaban asentados en la selva tropical, establecieron diferentes técnicas adecuadas para cada tipo de terreno: campos elevados en zonas inundables y terrenos con desnivel en zonas de excesiva humedad. Construían terrazas de cultivo sostenidas por muros, así podían modificar la pendiente del terreno, contribuyendo a preservar la humedad y a mejorar la fertilidad del suelo.

De este pequeño resumen de la historia ancestral del riego, podemos extraer una característica común en todas las civilizaciones. En las diferentes épocas y lugares, todas las civilizaciones compartían un gran grado de adaptación tecnológica a las condiciones climáticas y territoriales más adversas.

### 3 ESTADO ACTUAL DEL RIEGO EN LA AGRICULTURA

Se estima que en el mundo existen unos 1.400 millones de km<sup>3</sup> de agua, de los cuales 35 millones (2,5%) son de agua dulce (ver *Tabla 3.1*). Además, la gran cantidad de agua dulce de las capas polares, glaciares y acuíferos profundos no es utilizable. El agua dulce que puede ser usada procede esencialmente de la escorrentía superficial del agua de lluvia, generada en el ciclo hidrológico.

	<b>Vol. Agua (Millones de km<sup>3</sup>)</b>	<b>% de agua dulce</b>	<b>% de total de agua</b>
<b>Agua total</b>	1386		100
<b>Agua dulce</b>	35	100	2,53
<b>Glaciares y capas polares</b>	24,4	69,7	1,76
<b>Agua subterránea</b>	10,5	30	0,76
<b>Lagos, ríos y atmósfera</b>	0,1	0,3	0,01
<b>Agua salina</b>	1351		97,47

*Tabla 3.1 Distribución de los recursos hídricos mundiales*

A escala mundial, el 80% de toda el agua dulce va destinada al riego (ver *Figura 1.1*) con una creciente demanda en los recursos hídricos para estos fines. Por lo tanto, actualmente, el agua constituye un recurso escaso en varios países del mundo. El incremento de la población y la contaminación producida por el hombre han aumentado la demanda de este recurso. Por este motivo resulta cada vez más importante el estudio de las infraestructuras adecuadas para su almacenamiento, transporte y gestión. En los últimos años varias planificaciones de modernización de regadíos han proporcionado mejoras en estos puntos, trayendo a las comunidades de regadíos nuevas infraestructuras que en la mayoría de los casos son de gran tamaño. Sin embargo, este factor complica el control de las redes de riego. Durante muchos años el control de los sistemas de riego ha sido llevado a cabo de forma manual. El principal inconveniente, además de la dificultad, es la imposibilidad de obtener el conjunto de parámetros eficientes que permiten una gestión productiva del agua.

El transporte de este volumen de agua en canales abiertos lleva asociado una baja eficiencia, ya que se producen pérdidas por infiltración, evaporación y además, por operaciones de control ineficientes. Las pérdidas producidas durante las operaciones de control de las compuertas en los canales se deben a la dificultad para suministrar de forma precisa los caudales deseados. Estos caudales derivados, dependen del nivel de agua en las posiciones de las tomas laterales, los que a la vez se encuentran condicionados por las posiciones de las compuertas transversales. De esta forma, para realizar una variación en los caudales de las tomas laterales se requiere una modificación de las posiciones de las compuertas transversales del canal. Por lo tanto, para realizar una correcta operación del canal es necesario conocer el comportamiento del mismo durante los estados transitorios provocados por los movimientos de las compuertas. En este sentido, la simulación

computacional basada en un modelo hidrodinámico adecuado, se ha convertido en una técnica muy conveniente para la determinación de protocolos de manejo de compuertas de canales de riego.

Tomando como referencia un estudio realizado por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), podemos deducir que en los próximos treinta años la eficiencia de riego puede incrementarse de un promedio del 38% al 42%, así pues, debe ser prioridad aumentar la eficiencia del riego, produciendo más por cada m<sup>3</sup> de agua empleado, y esto a su vez tiene una repercusión inmediata en el ahorro de agua. Según otro estudio [Liria, 2001] de la Comisión Internacional de Riegos y Drenajes (ICID), el transporte, el riego y el consumo de agua por parte de las plantas se reparte a partes iguales en:

- 1/3 se pierde en el transporte y la distribución
- 1/3 se pierde en la aplicación sobre la parcela y
- 1/3 se consume en la evapotranspiración de las plantas.

La primera parte, perdida en la distribución y el transporte, se realiza mediante los siguientes mecanismos:

- Infiltración
- Evaporación
- Operación de control y regulación

[Goussard, 1993] asegura que se puede llegar a ahorrar hasta un 10% de esa tercera parte del total perdido en distribución y transporte, simplemente mejorando las operaciones de control a través de las redes de canales. Con lo cual, se justifica una inversión en desarrollo de tecnología que permita mejorar la eficiencia en el transporte de agua de riego, y este trabajo versará sobre una manera de ayudar a reducir esta cantidad anual perdida de agua dulce a nivel mundial.

## 4 REGULACIÓN AUTOMÁTICA EN SISTEMAS DE RIEGO

---

Idealmente, un sistema de riego habría de asegurar el envío y posterior entrega de agua a los regantes de acuerdo con sus requerimientos actuales, tanto desde el punto de vista del instante de entrega como de su cantidad. En la práctica, este objetivo rara vez se consigue, debido a dos razones principales [Goussard, 1993]:

1. Los requerimientos de agua de los cultivos son, en el mejor de los casos, aproximaciones; y se basan tanto en estimaciones de los agricultores de las necesidades, posiblemente sobreestimadas, como en estimaciones de los responsables del riego, los cuales se basan en registros climatológicos y previsiones del tiempo y los datos de los propios cultivos. En este último caso, la existencia de la discrepancia entre la demanda anticipada y la actual dependerá de factores como la duración del periodo de previsión, la frecuencia de actualización de los datos y la variabilidad de las condiciones climatológicas en tiempo y espacio, así como de la diversidad de cultivos.
2. Para poder suministrar las necesidades de agua de todos los cultivos hace falta reunir todas las demandas en los puntos donde se realiza la extracción lateral del canal principal (puntos de salida de agua hacia la red secundaria) y posteriormente, que la demanda resultante en estos puntos sea transportada a través del sistema de forma que se disponga en el momento preciso y en la cantidad requerida. Además, se ha de asegurar que las posibilidades físicas del canal no sean superadas, restringiendo el nivel de agua en un periodo de operación para evitar desbordamientos y para controlar las salidas laterales de caudal en los mencionados puntos de extracción.

El problema de ajustar el transporte y envío de agua a la demanda en muchos sistemas de abastecimiento de agua es especialmente arduo y pesado en el caso de una red de canales, donde el flujo de agua no suele ser estacionario y donde las distancias de transporte y en consecuencia los tiempos de envío son muy grandes. A pesar de estas dificultades, es posible lograr el objetivo si se utilizan las técnicas adecuadas. El alcance de este logro dependerá de las técnicas utilizadas, pero, los elementos clave para un control efectivo del sistema tendrían que incluir los siguientes pilares básicos de la automatización [Soler y Guitart, 2003]:

- Un equipamiento adecuado para el control de los niveles de agua, los caudales y los volúmenes de agua, como por ejemplo, compuertas.
- Una estrategia de control o algoritmo de control.
- Un método de regulación, por ejemplo, orientado a satisfacer la demanda.

Tradicionalmente, las estructuras reguladoras han estado controladas de los operarios designados (control manual local). Este tipo de control solamente tiene en cuenta el estado



del canal en base a datos locales próximos al controlador mientras que un control óptimo tendría que tener en cuenta el estado de todo el canal. En la práctica, ningún operario, por muy experimentado que sea, puede tener en cuenta todos los parámetros del sistema, ya que es muy complejo. Además, el control manual tiene otros inconvenientes como son la no total disponibilidad de personal para poder atender continuamente a cada una de las estructuras, el grado de dedicación y motivación y su habilidad para resistir las posibles presiones de los regantes.

Por todo esto, habitualmente las estructuras de control son posicionadas incorrectamente y la operación es, por tanto, irregular y/o fuera de tiempo. Por los mismos motivos, las medidas y las lecturas pueden ser imprecisas, incluso, falseadas. Estos errores, junto con las pérdidas por infiltración, reducen la eficiencia del transporte y la distribución. La pérdida resultante de seriedad, flexibilidad y equidad en las entregas parece ser la causa de los muy bajos rendimientos de muchos proyectos de riego.

Esta situación va en detrimento de los agricultores, los cuales acaban teniendo bajas producciones, insatisfacción y falta de sensibilidad hacia el medio ambiente, lo que da lugar al encharcamiento del suelo y la salinización. [Clark, 1972] y [Clemmens y Repogle, 1989] aseguran, basándose en la experiencia mundial, que una dirección importante en la solución de esta problemática es la regulación automática de la distribución del agua en los sistemas de riego, la cual garantiza:

- Un aumento de la efectividad en el uso de este preciado recurso.
- Un ahorro de energía eléctrica.
- Una disminución considerable de las pérdidas improductivas de agua en conseguir una estricta correspondencia entre las demandas y las entregas de agua.
- Un aumento de la efectividad en la explotación de los canales de riego y en la producción de alimentos.

Muchos de los problemas mencionados anteriormente, considerados demasiado a menudo inevitables, pueden ser evitados en la mayoría de los casos mediante la automatización, que en esencia reduce la intervención del hombre en las operaciones. A pesar de que la adopción de automatismos comporta probablemente un aumento de recursos en las etapas de diseño e implementación, cualquier coste de inversión adicional puede ser fácilmente justificado por las mejoras de los rendimientos que se derivan de la introducción. El beneficio incluye:

- Mejora de la eficiencia de transporte y distribución que llevan como consecuencia un incremento en la eficiencia total en el uso de agua de un 10% o más [Goussard, 1993]. De esta manera, el agua ahorrada puede ser utilizada para incrementar la intensidad de los cultivos o bien para aumentar la superficie cultivada.

- Reducción del consumo de agua y de los requerimientos punta que pueden permitir una reducción de la capacidad de almacenaje, de transporte y de distribución propias de los canales y de las estaciones de bombeo; con el consiguiente ahorro económico constructivo y con los requerimientos energéticos por bombeo reducidos.
- Simplificación de las tareas de control que hacen posible la reducción de personal de operación. En este aspecto se ha de enfatizar que la automatización no implica necesariamente el uso de equipos sofisticados de difícil utilización y mantenimiento.
- Mejora del control de los niveles de agua, lo cual lleva a bajos costes de mantenimiento gracias a la reducción o eliminación de cambios rápidos de nivel.
- Control de los volúmenes de agua enviados permitiendo la introducción de cambios volumétricos de agua que estimulen a los regantes a buscar el consumo óptimo de agua.
- Confianza en el envío y la equidad en la distribución, creando un clima de confianza entre los propios regantes y entre los regantes y los gestores del agua, lo que permitiría poner fin a la malversación de agua. Un clima de confianza como éste es una condición esencial para el éxito de otras medidas beneficiosas para la gestión del agua tal y como la organización de asociaciones de usuarios y la participación en las operaciones de regulación y mantenimiento.

Hay, sin embargo, dos desventajas potenciales que han de ser consideradas antes de comenzar cualquier proyecto para la provisión de control automatizado:

- Algunos tipos de aparatos de control automático de agua son más vulnerables al vandalismo que las compuertas convencionales cerradas con candados. La experiencia ha demostrado que este problema puede ser evitado con casetas permanentes y con la educación de los usuarios. Este último aspecto está íntimamente ligado con el clima de confianza que se ha mencionado antes.
- La capacidad para variar las descargas de agua – que es una característica básica y el objetivo del control – podría aumentar el riesgo de sedimentación en los canales que llevan agua altamente cargada de sedimentos. Un estudio exhaustivo de estos casos podría demostrar que el control automatizado podría ser inadecuado o tan sólo aplicable con ciertas restricciones, como por ejemplo restringiendo el grado de las variaciones permisibles del flujo y/o limitando el número y la localización de las estructuras de control.

No hay ningún sistema ideal de control automático, aplicable en todos los casos. No obstante la gran diversidad de lógicas de control (algoritmos), de programas (software) y equipamientos (estructuras de control, hardware) existentes dan suficiente flexibilidad como para permitir el diseño de un sistema óptimo que tenga en cuenta las condiciones técnicas, económicas y sociales para cada proyecto particular.

La automatización no evita la introducción de otras medidas físicas o institucionales que tengan como objetivo la mejora en la eficiencia. Cuando estas medidas son aplicadas aisladamente, no suelen tener los resultados esperados. En cambio, en el caso de ser aplicadas junto con la automatización, pueden elevar sus efectos gracias a un mejor clima entre los usuarios, creado por las condiciones de suministro fiables conseguidas gracias al sistema de control.

## 5 ALGORITMOS DE CONTROL DE COMPUERTAS EN CANALES

---

Un algoritmo es un procedimiento paso a paso concebido para resolver un problema o conseguir un objetivo. Un algoritmo de control de canales es un algoritmo que procesa unas entradas, por ejemplo, medidas de nivel, y proporciona una acción de control, o sea, un movimiento de compuerta. Habitualmente, los algoritmos de control se expresan en términos de ecuaciones matemáticas, las cuales son la base de los programas que se implementan en ordenadores. Un sistema de control, o controlador, ha de incluir tanto programas como maquinaria. Puede incluir sensores, equipos de comunicación, suministradores de electricidad, aparatos electromecánicos y equipo humano.

En los últimos veinte años se han desarrollado varios algoritmos de control, como el Proporcional-Integral-Derivativo (PID), ubicación de polos, localización de raíces, control predictivo, regulador cuadrático lineal (LQR por sus siglas en inglés) o heurísticos, para mejorar la operación de canales de riego, a partir de la generación de reglas de control para adaptar el transporte y la distribución del agua en los canales principales a los programas de extracción de las tomas laterales [Malaterre, 1998]. Los resultados han sido buenos; sin embargo, estos algoritmos se han probado bajo simulación y en circunstancias diferentes.

La aplicación de estos algoritmos en las zonas de riego demanda información sobre las variables, instrumentación de estructuras de control y medios sofisticados para la transmisión de la información; es decir, están orientados a una operación automatizada de los canales. Al respecto se tiene poca experiencia [Clemmens, 1998]. Por tal razón, en el presente trabajo se intenta probar que la instrumentación de estructuras de control y la aplicación de sistemas de control permite mejorar la operación de canales de riego.

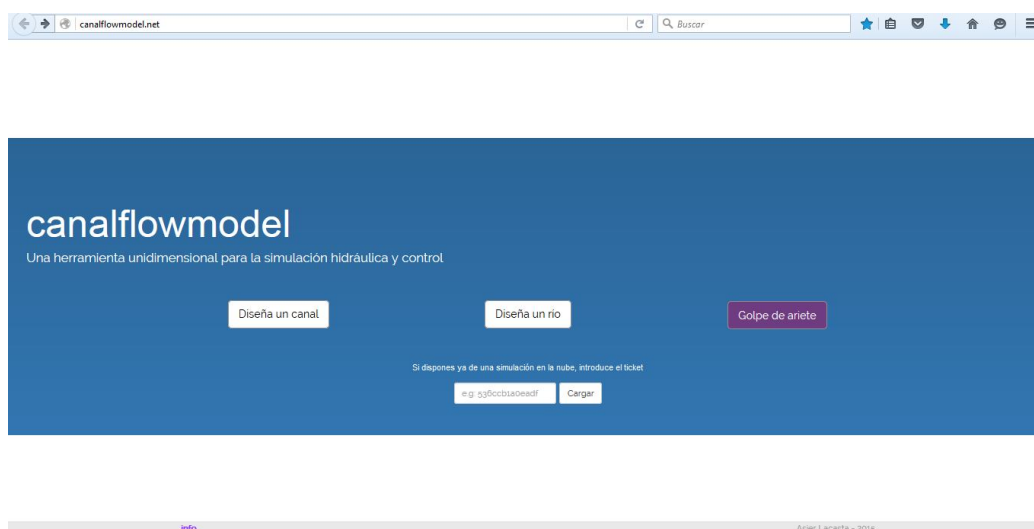
Actualmente, muchos de los sistemas de control no utilizan ningún algoritmo de control, porque los propios operadores proporcionan la lógica necesaria para decidir las acciones de control. El control supervisor manual permite monitorizar las condiciones hidráulicas de la red y manipular las estructuras de control desde la oficina central. Normalmente, las decisiones de control se basan más en la destreza y experiencia del operador que en los algoritmos. En este caso, el algoritmo sólo existe en la mente del operador. Con todo, un canal puede ser operado con un alto grado de flexibilidad y sensibilidad cuando al frente de la regulación hay una persona con experiencia.

La gran cantidad de algoritmos presentes en la literatura indica que no existe una solución global al problema de control, sino que hay una múltiple respuesta a problemas particulares. En este sentido, la línea iniciada con este proyecto va encaminada a conseguir un modelo de simulación que permita la regulación de cualquier canal de distribución de agua. El sistema de control ideal que se busca debería cumplir los siguientes requisitos:

1. Garantizar la estabilidad y ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos.
2. Ser eficiente siguiendo un criterio preestablecido. Normalmente este criterio consiste en que la acción de control sobre las variables de entrada sea realizable, evitando comportamientos bruscos e irreales.
3. Ser cómodo y fácil de operar en tiempo real con ayuda de un ordenador.

## 6 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN HIDRÁULICA: CANALFLOWMODEL

El modelo Canalfowmodel desarrollado por el grupo de Hidráulica Computacional de la Universidad de Zaragoza (<http://ghc.unizar.es>), es un programa diseñado para resolver numéricamente flujos transitorios 1D de superficie libre en todo tipo de cauces (canales y ríos), basado en computación en la nube sin necesidad de instalación local del programa. La aplicación se ejecuta yendo a la dirección <http://canalfowmodel.net/> que ofrece la pantalla de la *Figura 6.1*. En ella se ofrece la creación de casos nuevos y la posibilidad de abrir un caso existente mediante un sistema de tickets. En la descripción de cada uno de los casos que se han simulado objeto de la calibración de la herramienta aparece el nombre del ticket; de forma, que el lector de esta memoria puede introducir el nombre del ticket en la herramienta y simular directamente el caso viendo los resultados que se obtienen.



*Figura 6.1 Pantalla de acceso a la aplicación Canalfowmodel*

El modelo físico que representa el flujo de agua en un canal de riego en el programa de simulación Canalfowmodel se encuentra formado por el sistema de ecuaciones de aguas poco profundas 1D, sistema hiperbólico de ecuaciones no lineal en derivadas parciales que se deduce de las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento bajo ciertas hipótesis [Lacasta A. et al. 2014a]. Este sistema de ecuaciones se resuelve con un método numérico explícito de primer orden en espacio y tiempo partiendo de una condición inicial e imponiendo unas condiciones de contorno al dominio de cálculo y bajo un criterio de estabilidad numérica del paso temporal. Las compuertas en Canalfowmodel vienen representadas por ecuaciones algebraicas no lineales como condiciones de contorno internas que tienen en cuenta si el flujo no pasa a través de ellas o lo hace como flujo libre

o bajo presión [Morales et al., 2013]. En esta herramienta de simulación se ha programado un algoritmo de control de compuertas de tipo PID [Lacasta et al. 2014a].

De esta forma, a la hora de querer simular computacionalmente un caso necesitaremos introducir la geometría del caso, las condiciones iniciales, las condiciones de contorno, los parámetros de las compuertas y las especificaciones para el control. Todo ello se detalla en el *Anexo 1: Canalfowmodel* donde se muestra un tutorial de manejo del programa con indicaciones personales sobre el uso del mismo.

## 7 RESULTADOS NUMÉRICOS

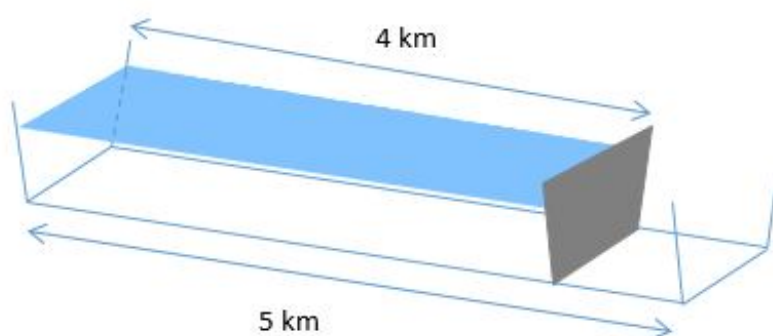
---

### 7.1 SENSIBILIDAD DE UN CANAL TRAPEZOIDAL CON UNA COMPUERTA TRANSVERSAL ANTE DIFERENTES PERTURBACIONES

Como punto de partida se presentan una serie de casos sencillos donde se conoce a priori la solución. Estos primeros casos sirven para comenzar a interactuar con la herramienta de simulación Canalfowmodel, donde partimos desde la realización de un estacionario (caso 1) hasta un canal con dos compuertas transversales y una toma lateral (caso 5). Los detalles de los casos junto a los resultados numéricos y análisis de los mismos se encuentran en el *Anexo 2*.

Entre los casos simulados del 1 al 5 que se presentan en el *Anexo 2*, vamos a destacar el caso 3 en el que se ha simulado el control del flujo de agua en un tramo de canal manteniendo constante el nivel aguas arriba de la compuerta de regulación (ver *Figura 7.1.1*). La geometría y datos necesarios para la simulación se encuentran en la *Tabla 3.1 del Anexo 2*. Este sistema de regulación está orientado al aporte de agua, puesto que responderá de forma adecuada ante variaciones de caudal que se puedan producir aguas arriba.

Se puede recrear el caso introduciendo el siguiente ticket en la herramienta <http://canalfowmodel.net/>: *caso3unacompuerta*.



*Figura 7.1.1 Vista 3D del canal correspondiente al caso 3 y situación de la compuerta transversal*

La condición inicial de partida es de lecho seco. La condición de contorno de salida asegura la salida subcrítica de flujo de agua y como condición de contorno de entrada se introduce un hidrograma triangular como el de la *Figura 7.1.2*. Lo que se espera obtener es que la compuerta sea capaz de regular su apertura para conseguir un nivel de altura de agua constante de 3,5 m en todo el canal.



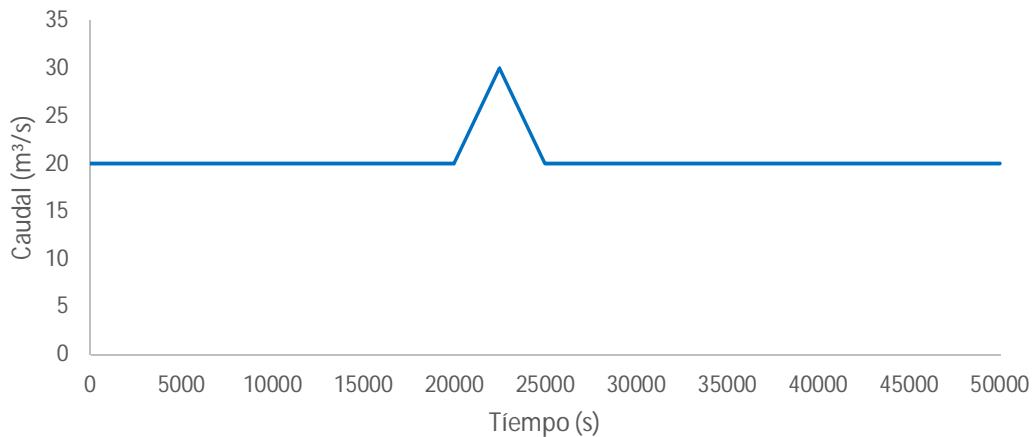
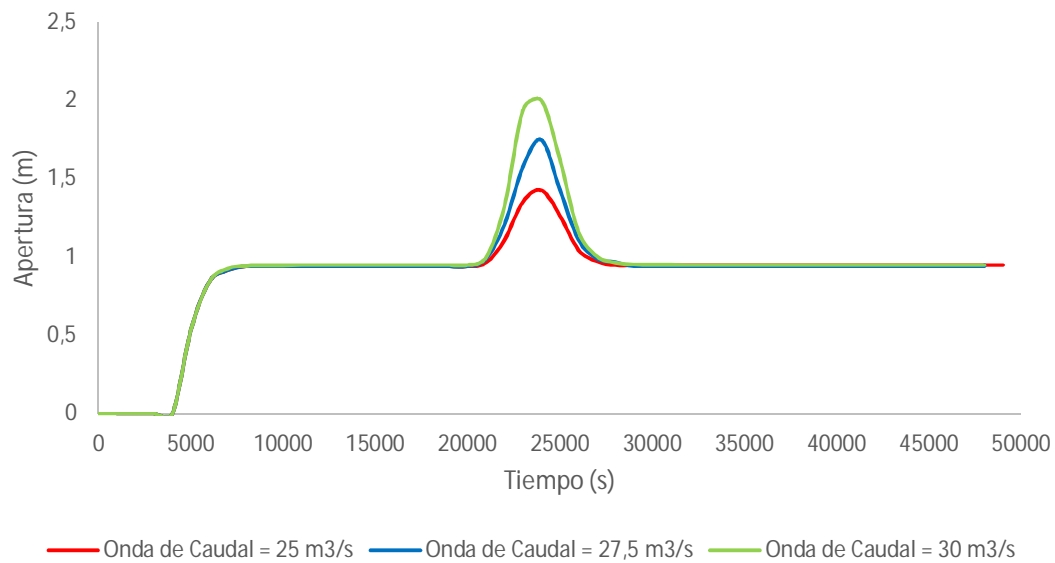


Figura 7.1.2 Hidrograma de entrada de caudal del caso 3

Para poder conseguir el objetivo de regulación de agua en el canal se coloca una compuerta transversal como se muestra en la *Figura 7.1.1*. El sistema de control instalado debe manipular el elemento regulador para mantener la lámina de agua pivotando sobre el extremo aguas abajo del tramo. Aunque varíe el caudal aguas arriba – por ejemplo por la apertura del embalse para suministrar agua, o una extracción lateral de caudal, que disminuya el caudal del flujo – el control sobre la compuerta deberá ser capaz de mantener el nivel aguas arriba de la misma constante, e igual al valor objetivo fijado.

En este caso se quiere comprobar la capacidad del regulador PID para actuar correctamente ante distintas perturbaciones, sean del tamaño que sean. Con lo cual se introducen diversos hidrogramas a la entrada con la misma forma pero con diferentes picos y amplitudes y se observa la respuesta del método de control (ver *Anexo 2*). Por un lado se va a estudiar lo que ocurre al variar el pico de caudal introducido en la entrada y por otro lado lo que ocurre si el pico de caudal se mantiene constante y se varía la anchura del hidrograma; es decir, pensando en situaciones en las que la perturbación entra durante más o menos tiempo.

Cuanto mayor es el tamaño de la perturbación, en términos de caudal, la compuerta tiene que abrirse más para lograr que ese aumento de caudal viaje aguas abajo y el nivel aguas arriba de la compuerta no aumente. En la *Figura 7.1.3* se muestra la evolución de la apertura de la compuerta para los casos de caudal de 25 m³/s (rojo), 27,5 m³/s (azul) y 30 m³/s (verde) a lo largo de todo el dominio temporal. Los hidrogramas introducidos son iguales, en forma triangular y de la misma amplitud de tiempo que el introducido en los casos anteriores (ver *Figura 3.3 del anexo 2*), simplemente se ha reducido el pico de caudal para observar la respuesta de la compuerta.



*Figura 7.1.3 Evolución temporal de la apertura de la compuerta para distintos picos de caudal del caso 3*

Para seguir con el estudio de la influencia de las perturbaciones, se analizó la anchura del hidrograma de entrada. En esta simulación se modifica la duración de la perturbación para comprobar si el sistema responde también ante este tipo de perturbaciones.

Se ha analizado la respuesta del algoritmo de control con un pico de caudal de 25 m<sup>3</sup>/s que entra durante 2.000, 5.000 y 10.000 s.

En la *Figura 7.1.4* se representa la evolución temporal de la apertura de la compuerta en estos tres casos. Obviamente el máximo en la apertura de la compuerta y por lo tanto en el nivel se produce antes conforme la anchura de la perturbación es menor. Como el volumen de agua introducido en el canal es menor, la variación de la apertura de la compuerta necesaria para mantener el calado aguas arriba constante es menor como se puede observar en la *Figura 7.1.4* con una anchura de onda de caudal de 2.000 s (rojo). Para los picos de caudal de 5.000 s (verde) y de 10.000 s (azul) vemos como el regulador actúa correctamente aumentando en medida y en tiempo la apertura de la compuerta para así seguir manteniendo la altura objetivo deseada.

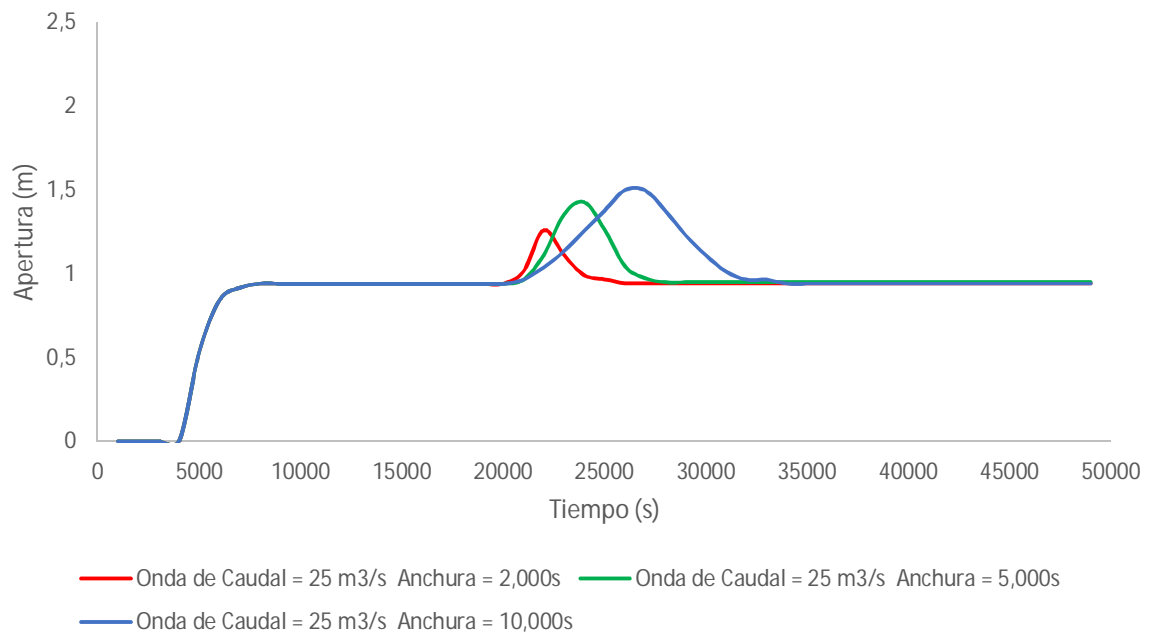


Figura 7.1.4 Evolución temporal de la apertura de la compuerta para distintas amplitudes del mismo pico de caudal del caso 3

### 7.1.1 Análisis de sensibilidad de los parámetros de simulación del controlador PID de la compuerta

Dentro de la regulación del controlador PID podemos configurar los parámetros con la regulación del tramo a simular, esto nos permitirá ajustar la simulación. En función de los valores de estos parámetros la simulación nos proporcionará unos resultados más precisos. Este análisis busca el objetivo de conseguir que las compuertas transversales alcancen sus alturas objetivo realizando los mínimos movimientos posibles. Este es un factor clave ya que permite optimizar al máximo los movimientos de las compuertas transversales, por lo tanto permite reducir los consumos para accionarlas, reduce riesgos de problemas mecánicos y reduce el número de ondas tanto aguas arriba como aguas abajo provocadas por el movimiento de las compuertas. Por lo tanto, a la hora de realizar el análisis ha sido el único factor a tener en cuenta.

Los parámetros a modificar son:

- Periodo de integración del controlador (TI)
- Periodo de derivación del controlador (TD)
- Periodo de muestreo del controlador (TS)
- Banda muerta, donde se define el margen de no actuación de la compuerta (BM)

En este caso se ha realizado un ensayo modificando todos los valores anteriores barriendo todo su rango de posibilidades. Los resultados que se han obtenido han sido los siguientes:

### ***Periodo de integración del controlador (TI)***

El periodo de integración utilizado en este caso verifica que

- Para valores inferiores a 1.000 s los valores de la simulación oscilan en exceso.
- Para valores cercanos a 2.500 s la simulación sale correcta.
- Para valores superiores a 3.000 s la simulación cada vez sale más desajustada.

Podríamos utilizar unos valores de TI entre 2.000 s y 2.700 s para obtener unos buenos resultados, siendo 2.500 s el valor óptimo.

### ***Periodo de derivación del controlador (TD)***

El periodo de derivación tiene las siguientes propiedades:

- Desde un valor de 0,1 s hasta 40.000 s los resultados son correctos.
- Para valores superiores a 40.000 s la simulación cada vez sale más desajustada.

Es evidente que para éste parámetro tenemos un amplio abanico donde elegir y no modificar prácticamente la simulación, se puede decir que este parámetro no tiene casi influencia en los resultados de la simulación.

### ***Periodo de muestreo del controlador (TS)***

El periodo de muestreo cumple los siguientes requisitos:

- Nunca valores inferiores a 1 s, ya que distorsiona gravemente la simulación.
- Desde 1 s hasta 1.000 s la simulación va saliendo cada vez mejor.
- Para valores aproximados a 1.000 s la simulación sale correcta.
- Para valores superiores a 1.000 s la simulación cada vez sale más desajustada.

Con lo cual un valor cercano a 1.000 s nos proporciona un buen resultado, siendo 1.000 s el valor óptimo.

### **Banda muerta (BM)**

El valor de BM define el rango de no actuación de la compuerta, esto quiere decir que tenemos una tolerancia a la hora de actuar la compuerta. Este dato es muy importante ya que si definimos una BM muy elevada, la compuerta no actuará para conseguir la altura objetivo ya que tiene un rango de no actuación muy elevado. Por el contrario si definimos un valor muy bajo, la compuerta actuará constantemente con el perjuicio citado anteriormente que esto supone. Con lo cual es importante encontrar un valor medio, donde la compuerta actúe alcanzando las alturas objetivo pero realizando los mínimos movimientos posibles.

- Valores lo más cercanos a 0 m, nunca han de ser superiores a 1 m.
- De 0,01 m a 1 m, conforme aumentamos el valor cada vez sale peor la simulación.
- Con un valor de 0,01 m la simulación ya sale correcta.

Obtenemos un valor óptimo de 0,01 m, si aumentamos este valor puede ser que la compuerta no alcance las alturas objetivo, y si reducimos este valor la compuerta realizará más movimientos para alcanzar la altura objetivo, y esto no nos interesa.

Según el análisis realizado de la sensibilidad de los parámetros de simulación del controlador, los valores óptimos elegidos han sido los que se reflejan en la *Tabla 7.1.1.1*.

<b>TI (Periodo de integración del controlador) (s)</b>	2.500
<b>TD (Periodo de derivación del controlador) (s)</b>	0,1
<b>TS (Periodo de muestreo del controlador) (s)</b>	1.000
<b>BM (Banda muerta) (m)</b>	0,01

*Tabla 7.1.1.1 Valores óptimos del regulador PID para el caso 3*

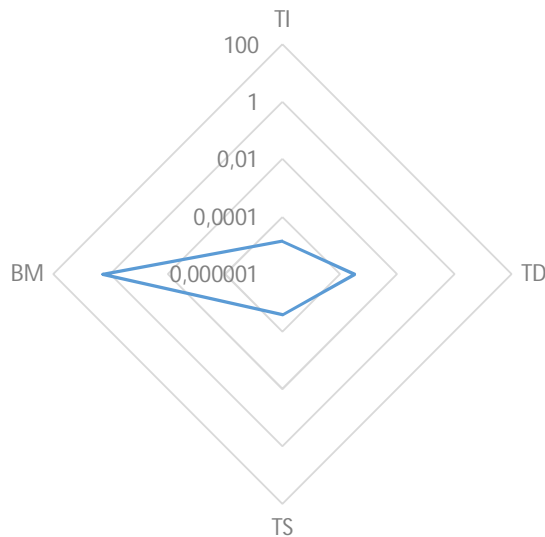
En la *Figura 7.1.1.1* se muestra un gráfico radial donde se puede observar claramente la sensibilidad de la simulación al modificar un parámetro en concreto. El cálculo de la sensibilidad se ha hecho de manera directa utilizando distintos valores para cada uno de los parámetros utilizando la siguiente expresión

$$\delta G_p = \frac{dG}{dP} = \frac{G_i - G_{i-1}}{P_i - P_{i-1}} \quad (1)$$

dónde G es la apertura media y P es el parámetro sobre el que se mide la sensibilidad. Vemos que TI y TS se mueven en el mismo orden de magnitud, donde la variación de cualquiera de estos dos parámetros no modifica demasiado la simulación. Por otro lado TD está un orden de magnitud por encima de los anteriores, la simulación ya muestra cambios más significativos al modificar este parámetro. Por último BM está cuatro órdenes de magnitud por encima de TD, sin duda alguna este parámetro es el más sensible y con el que

hay que tener más cuidado a la hora de manipularlo ya que modifica por completo la simulación.

A priori era fácil de prever este resultado ya que la Banda Muerta define la tolerancia de la compuerta. Si nuestro valor de BM es 0,01 m, y la altura objetivo es 3,5 m, la compuerta sólo actuaría cuando la altura fuera superior a 3,51 m o inferior a 3,49 m. Con lo cual si modificamos la BM y acercamos su valor en demasía a 0 m, la compuerta estaría constantemente modificando su posición ante pequeñas variaciones, esto no es lo deseado principalmente por el gran desgaste de los componentes mecánicos que realizan el movimiento de ésta, además de los otros problemas citados anteriormente. Por otro lado, si aumentamos demasiado el valor de BM, vamos a tener una tolerancia muy grande, y la compuerta sólo actuará ante grandes variaciones, con lo que no podríamos alcanzar nuestros objetivos de regulación del canal.



*Figura 7.1.1.1 Sensibilidad de los parámetros de regulación del controlador PID de una compuerta transversal (Escala logarítmica)*

Hay que tener en cuenta que este análisis es orientativo, es útil para hacernos una idea de los parámetros a modificar y sus consecuencias, pero dependiendo de la simulación y de los datos introducidos, los parámetros óptimos pueden diferir de los aquí dados.

## 7.2 CANAL DE ANCHURA VARIABLE, SECCIÓN TRAPEZOIDAL Y PENDIENTE FUERTE CON 7 COMPUERTAS TRANSVERSALES Y 8 TOMAS LATERALES

En el *Anexo 2* se presentan los resultados numéricos obtenidos de las simulaciones de varios casos de flujo en un canal con compuertas transversales y tomas laterales definidos por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE) [Clemens, 1998]. Los estudios completos de estos casos se encuentran en el *Anexo 2* y en esta memoria se van a presentar sólo los resultados de uno de ellos. Se trata de un canal no ramificado con extracciones laterales por gravedad, además de un control de caudal mediante compuertas transversales. Se incluyen cambios en la demanda de las extracciones laterales para observar el correcto funcionamiento del regulador ante la necesidad de un control anticipatorio. El objetivo consiste en que el controlador sea capaz de mantener un nivel constante en el extremo aguas abajo de cada tramo del canal separado por una compuerta transversal, en el cual se encuentran las extracciones (tomas laterales). La geometría del caso se presenta en la *Figura 7.2.1*. Al final de cada tramo tenemos una compuerta transversal (rojo) y justo antes de ellas las tomas laterales (verde). Como condición inicial se parte de un estacionario de caudal constante  $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Se puede recrear este caso introduciendo el siguiente ticket en la herramienta <http://canalflowmodel.net/>: *caso6asce1test1*.

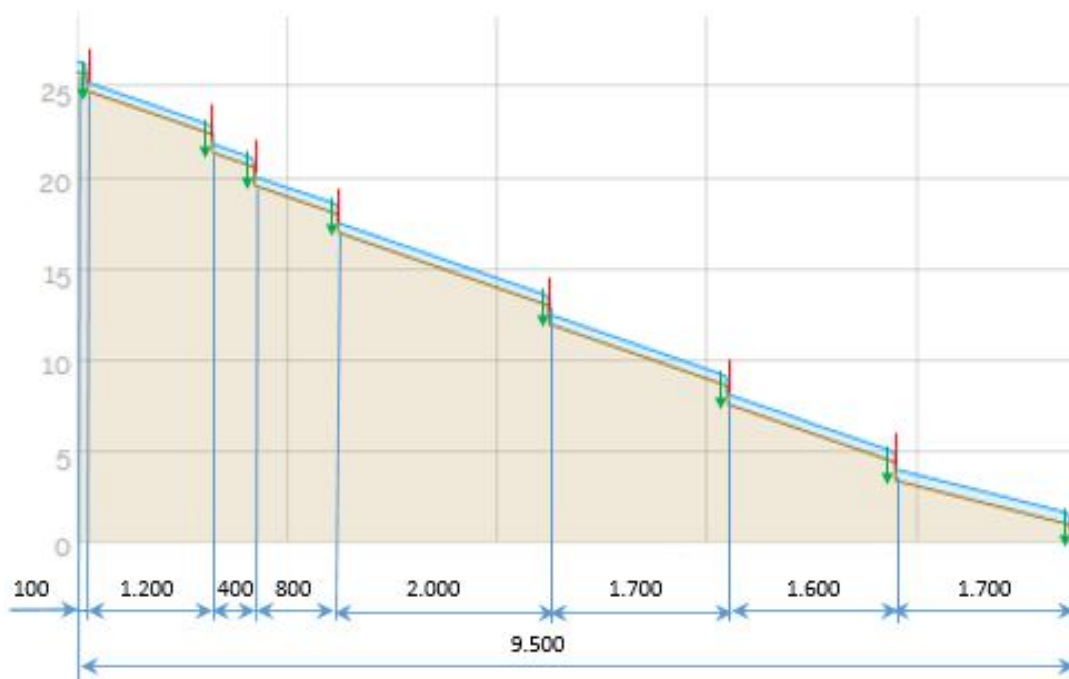
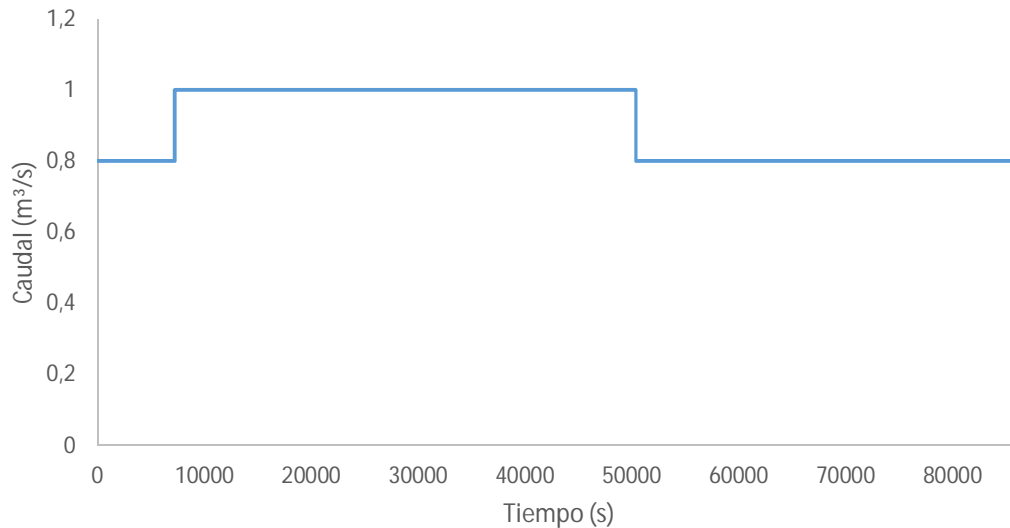


Figura 7.2.1 Perfil longitudinal en m del canal del Test 1 del caso 6

El flujo de entrada en el canal es continuo. Esto se consigue suponiendo que aguas arriba se tiene un depósito o un canal mucho más amplio o un río; y el hidrograma de entrada es el que se muestra en la *Figura 7.2.2*. La condición de contorno de salida se deja libre.



*Figura 7.2.2 Hidrograma de entrada del Test1 del caso 6*

Los datos de las compuertas transversales y las especificaciones de los parámetros de regulación PID se detallan en el *Anexo 2*. Todas las tomas laterales extraen un caudal de  $0,1\text{m}^3/\text{s}$ . A continuación se presentan algunos de los resultados numéricos obtenidos en la simulación. En la *Figura 7.2.3* se observan las aperturas de las 7 compuertas transversales, junto al nivel de agua y la altura objetivo buscada. Se puede observar que el nivel se ajusta bien a la altura objetivo buscada en cada una de las compuertas.



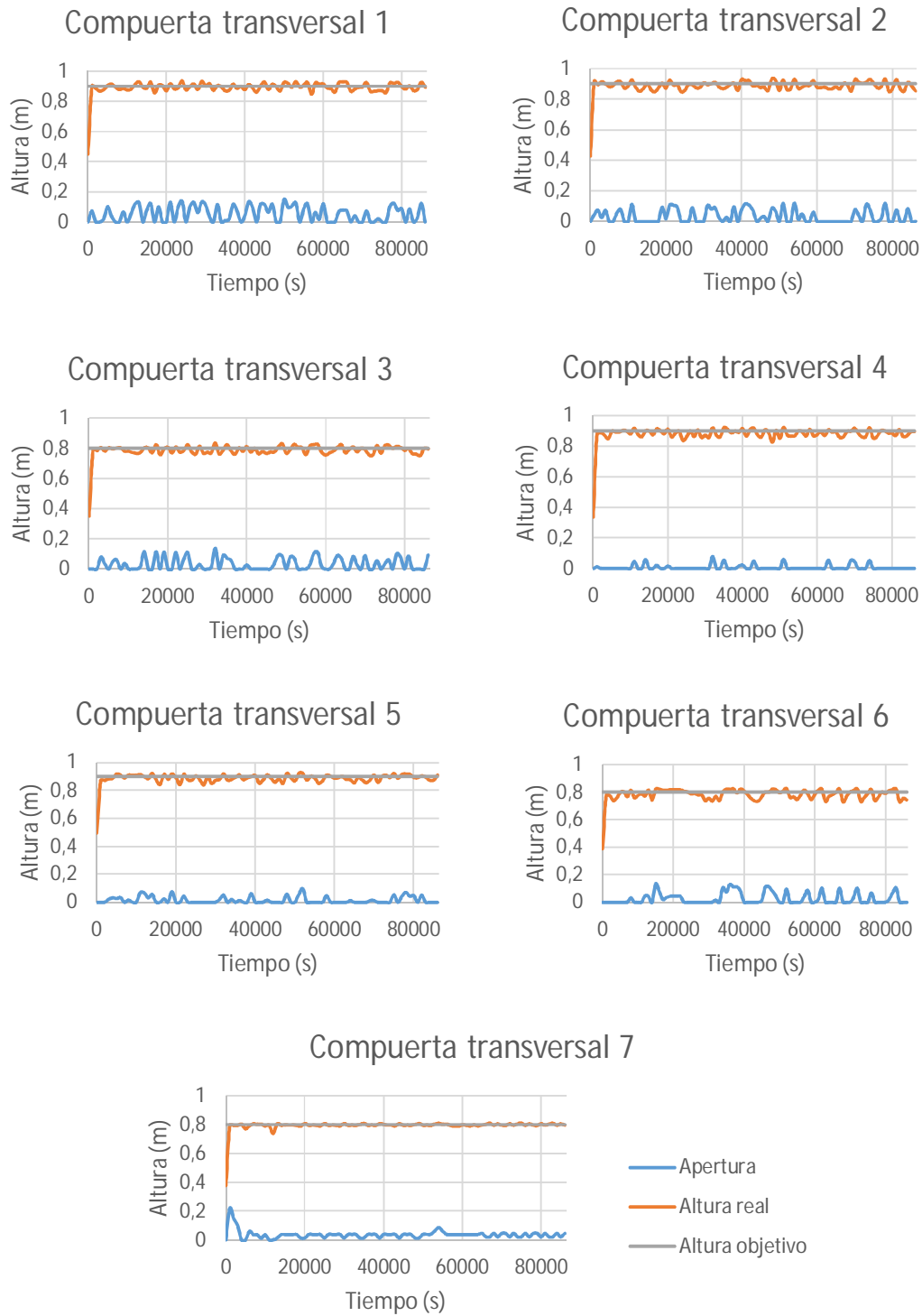
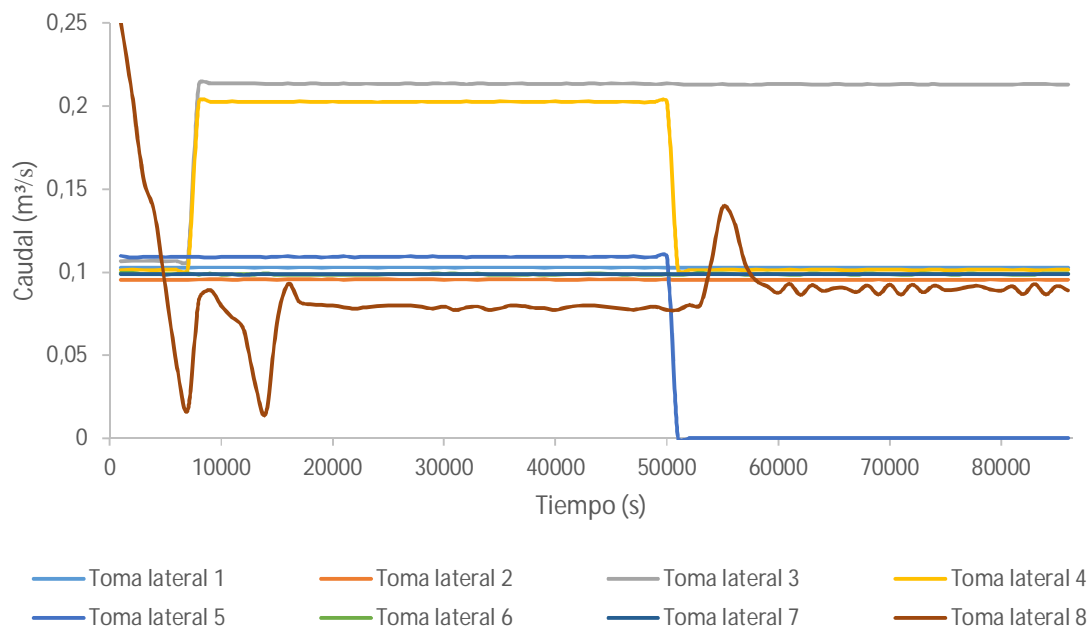


Figura 7.2.3 Evolución temporal de la apertura de las compuerta transversales 1 a 7 (azul), del nivel superficial del agua en los tramos 1 a 7 (naranja) y de las alturas objetivo en los tramos 1 a 7 (gris) del Test 1 del caso 6

A continuación se muestra la evolución temporal del caudal que se extrae por las 8 tomas laterales del test 1 del caso 6 (ver *Figura 7.2.4*). Se comparan los resultados con los presentados por ASCE [Clemens, 1998] (ver *Figura 7.2.5*). Analizando las dos figuras se puede observar que los resultados son semejantes, la única toma que difiere levemente es la toma lateral 8 que no tiene una extracción constante de caudal pero que aproximadamente lo consigue. Todo ello corrobora que el controlador PID de las compuertas transversales implementado en la herramienta de simulación Canalfloowmodel cumple con los objetivos marcados en la regulación del canal propuesto.



*Figura 7.2.4 Evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales 1 a 8 del Test 1 del caso 6*

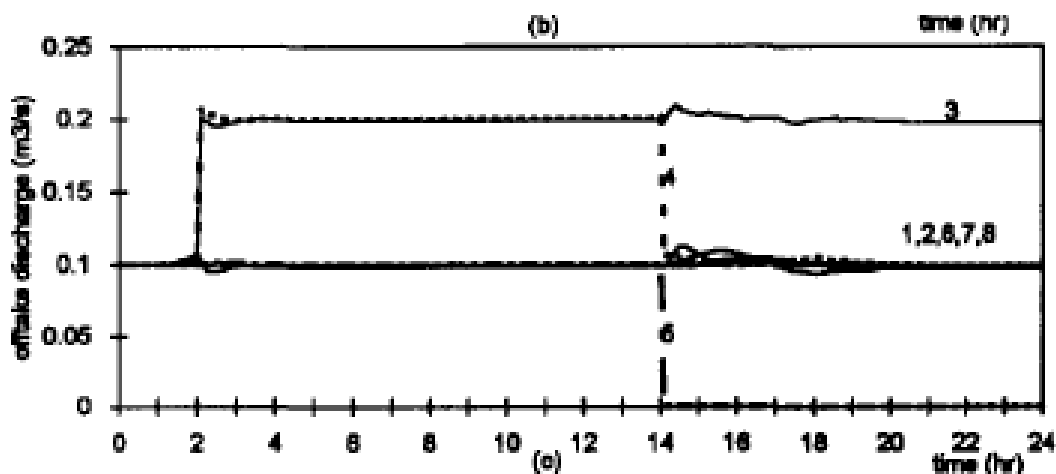


Figura 7.2.5 Evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales de ASCE del Test 1 del caso 6

### 7.3 CANAL DE RIEGO DE PINA DE EBRO

Después de haber calibrado, validado y ajustado los parámetros de simulación y regulación con los tests académicos y los tests de referencia, se procede a realizar una simulación de un canal real: el canal de riego de Pina de Ebro, pudiendo comparar los datos obtenidos con datos reales tomados del propio canal. Los detalles del caso se encuentran en el Anexo 2.

El canal se nutre del río Ebro que transcurre cercano a esta localidad. El canal sirve para suministrar mediante sus tomas laterales un caudal a las acequias adyacentes, y éstas a su vez aportar un caudal de agua a los terrenos colindantes para así poder ser regados. Consta de aproximadamente 12 km de longitud, sección recta y pendiente variable. Como elementos de regulación del caudal el canal cuenta con 4 compuertas transversales y 19 tomas laterales. El agua sobrante en el canal retorna al río Ebro. Se ha realizado la simulación correspondiente a 5 días; desde el 20 de enero de 2013 a las 00:00 h hasta el 25 de enero de 2013 a las 13:00 h. Con lo cual la simulación tendrá una duración total de 133 h (478.800 s). Se puede recrear el caso introduciendo el siguiente ticket en la herramienta <http://canalflowmodel.net/>: caso8pinadeebro.

La geometría del caso se presenta en la Figura 7.3.1, donde se ve la longitud total del canal, la longitud de cada tramo, y la pendiente del canal. También se muestra de manera orientativa la disposición de las compuertas transversales y de las tomas laterales. Se parte de una altura inicial de 3,42 m.

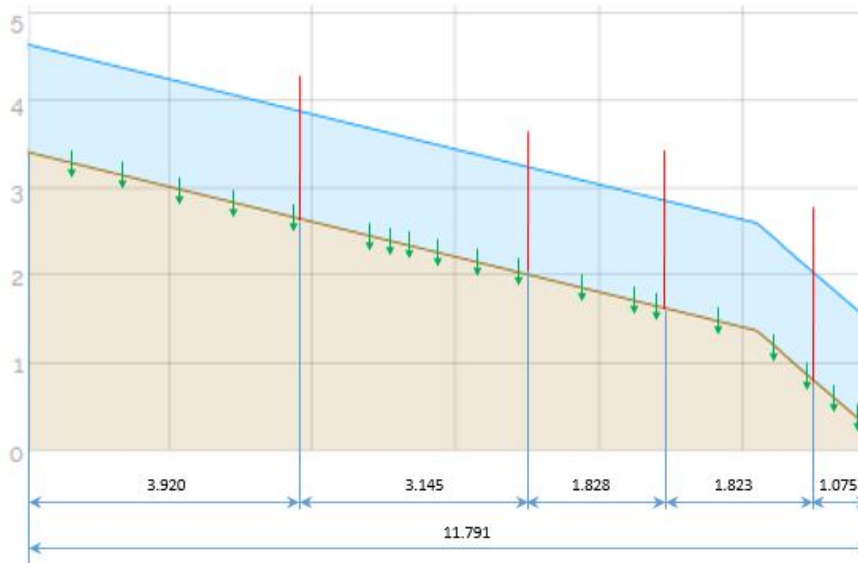


Figura 7.3.1 Perfil longitudinal en m del canal del caso 8. Localización orientativa de las compuertas transversales (rojo) y tomas laterales (verde)

El caudal impuesto como condición de contorno de entrada es el representado en la Figura 7.3.2 y responde a un hidrograma variable. Este hidrograma de entrada corresponde con los datos reales que fueron tomados a la entrada del canal durante los 5 días de nuestro estudio.

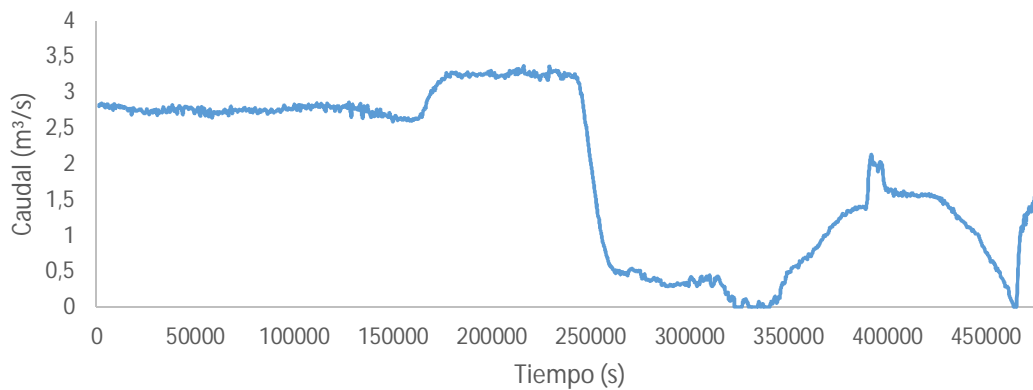


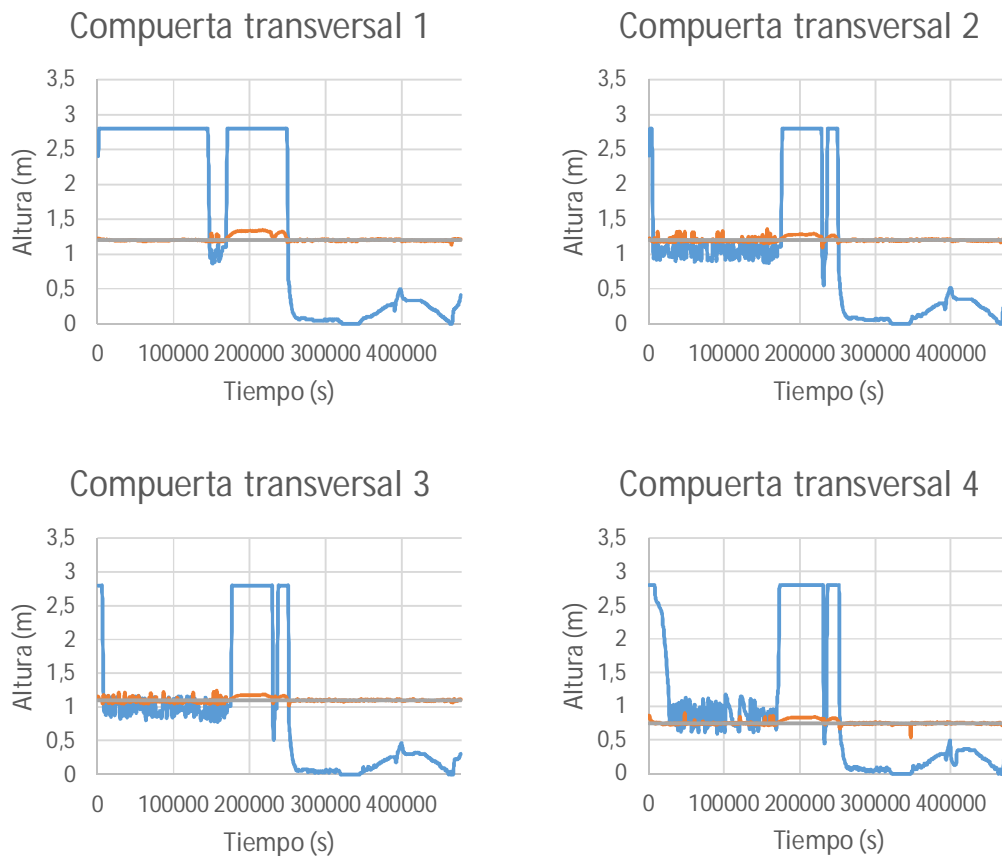
Figura 7.3.2 Hidrograma de entrada del caso 8

Los datos de las compuertas transversales, las especificaciones de los parámetros de regulación PID y los datos de las tomas laterales se detallan en el Anexo 2.

A continuación se presentan algunos de los resultados numéricos obtenidos en la simulación. A la hora de realizar esta simulación se ha tomado como objetivo principal el

caudal deseado por los regantes en cada instante. A partir de este objetivo la herramienta de simulación Canalfowmodel regula el caudal del canal de la forma más óptima posible para garantizar el suministro. Una vez obtenidos los resultados se compararán con los datos reales que se obtuvieron y se analizará que solución es más eficiente.

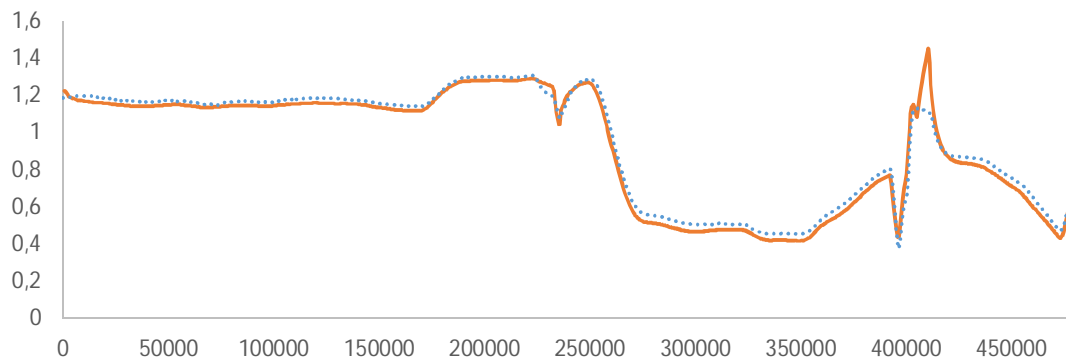
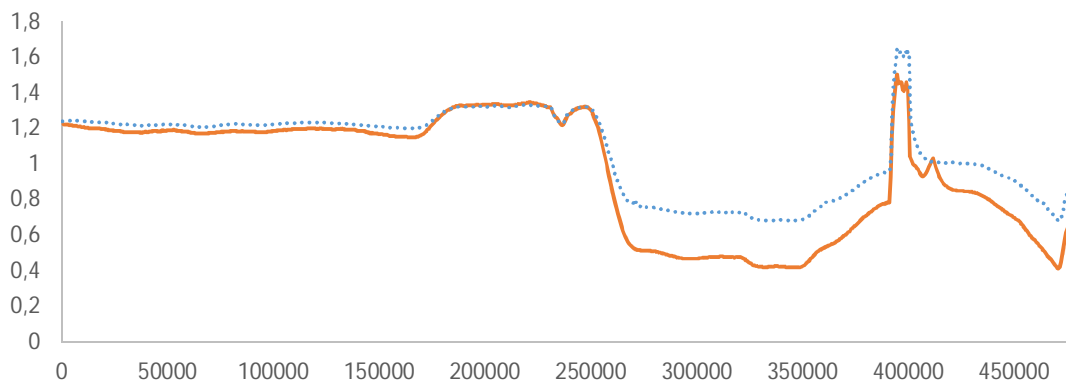
En la *Figura 7.3.3* se observan las aperturas de las 4 compuertas transversales, junto al nivel de agua y la altura objetivo buscada. Se puede observar que el nivel se ajusta bien a la altura objetivo buscada en cada una de las compuertas.



*Figura 7.3.3 Evolución temporal de la apertura de las compuerta transversales 1 a 4 (azul), del nivel superficial del agua en los tramos 1 a 4 (naranja) y de las alturas objetivo en los tramos 1 a 4 (gris) del caso 8*

Hemos visto como las compuertas transversales consiguen mantener a lo largo de la simulación un calado constante en cada tramo. En la *Figura 7.3.4* se muestran los calados

reales que se obtuvieron antes de cada compuerta transversal (azul). Vemos como en los datos reales, las compuertas transversales no modificaron correctamente su posición, con lo cual no mantuvieron un calado constante en cada tramo. Esto provoca que las tomas laterales no extraigan el caudal deseado por los regantes. A su vez también se muestran en color naranja los resultados numéricos que obtuvo la herramienta Canalflomodel al modelizar exactamente lo ocurrido en estos 5 días, es decir, realizando los mismos movimientos que realizaron las compuertas transversales reales del canal.



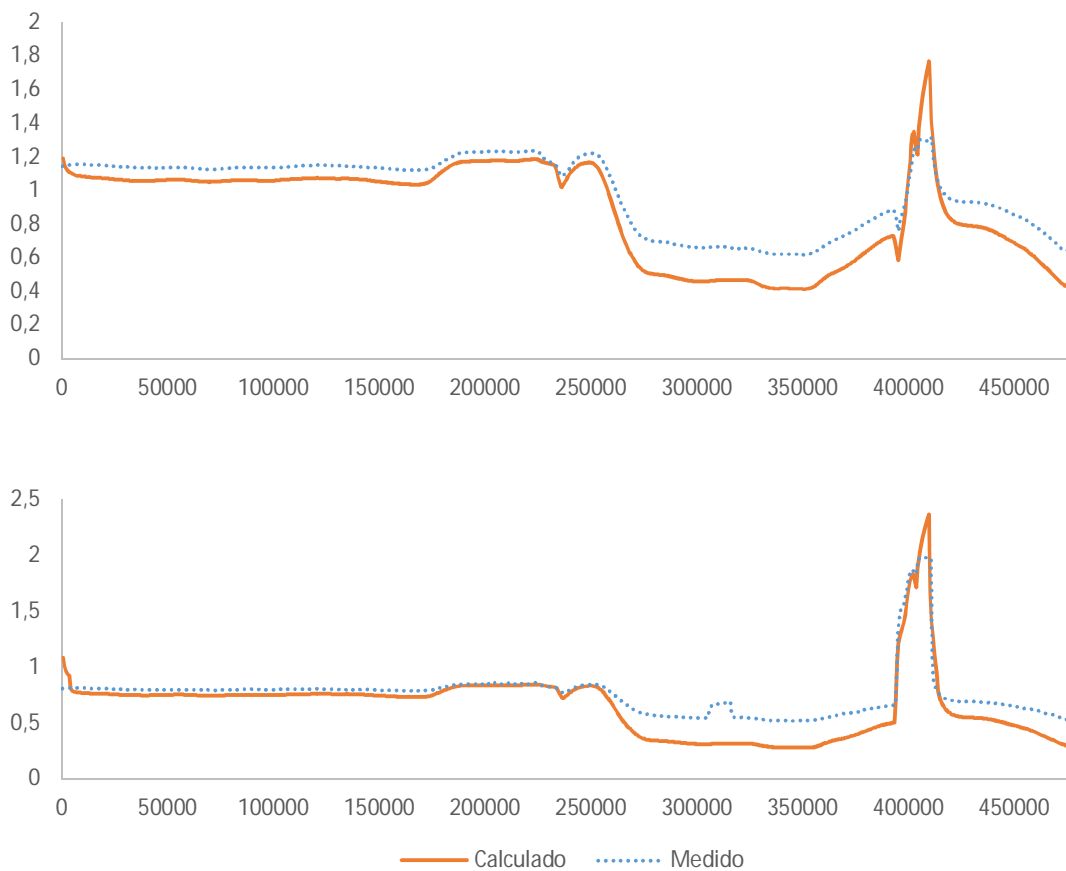


Figura 7.3.4 Evolución temporal del nivel superficial real (azul) y numérico (naranja) del agua en los tramos 1 al 4 del caso 8

Por último, nos queda por ver el comportamiento de las tomas laterales. En la *Figura 7.3.5* se muestran los caudales extraídos por las tomas laterales. Estos caudales obtenidos en las tomas laterales durante la simulación se pueden comparar con los datos de los caudales reales que se obtuvieron durante esos días (ver *Figura 7.3.6*). Si comparamos ambas figuras podemos ver como los caudales de extracción obtenidos son prácticamente idénticos.

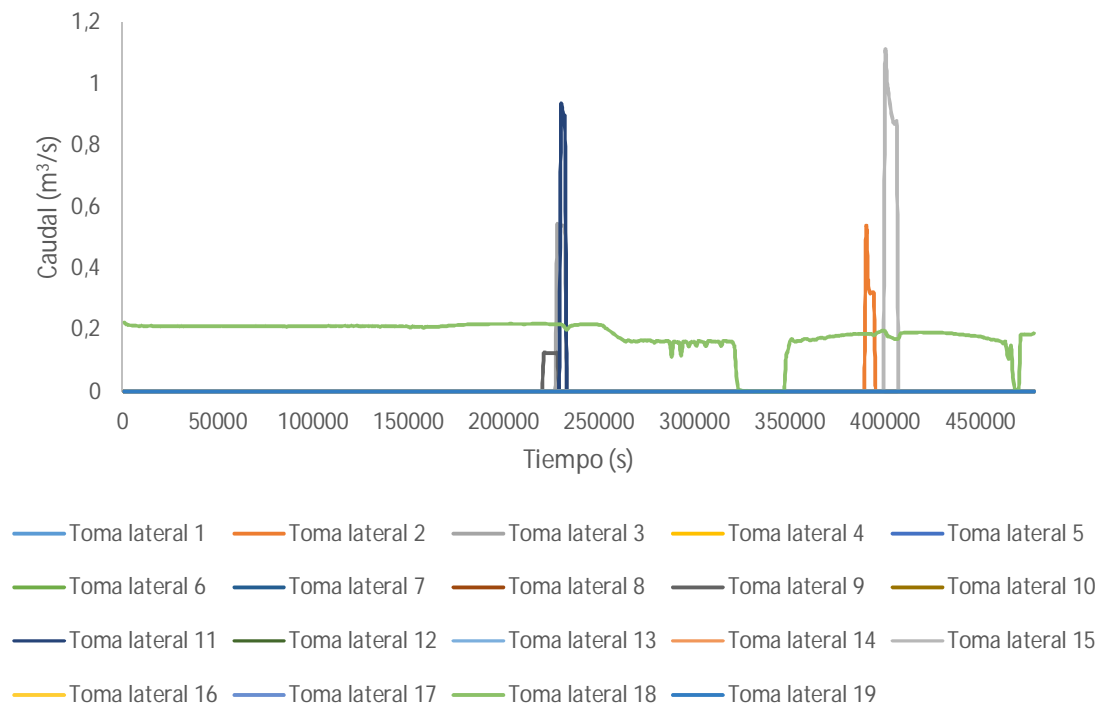


Figura 7.3.5 Evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales del caso 8

Caudales en tramos secundarios

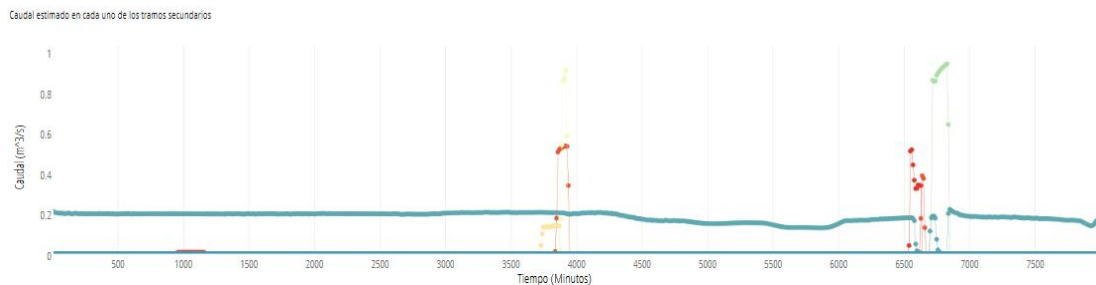


Figura 7.3.6 Evolución temporal del caudal de salida real de las tomas laterales del caso 8

Una vez presentados todos los resultados de la simulación y comparados con los datos reales, se observa que el regulador PID realiza una gestión más eficaz del canal de riego de Pina de Ebro, asegurando unos niveles superficiales constantes en cada tramo, lo que permite tener unas reservas hídricas dentro del propio canal, preparadas para ser desalojadas en cualquier momento por las tomas laterales y así satisfacer las demandas de los regantes tanto en cantidad como en el instante de suministro.



## 8 CONCLUSIONES

---

Se ha presentado un modelo de simulación numérica para la regulación del flujo en canales. La principal función de un canal es transportar agua de un lugar a otro. Para satisfacer las demandas de riego en una red de canales es necesario controlar el nivel de agua, y de esta manera se controlan los caudales. Dado que el flujo en canales es generalmente transitorio y la regulación manual resulta muy complicada, es necesaria la regulación automática. Esta herramienta informática (Canalflowmodel) controla el nivel de agua en un canal, según diferentes tipos de control, bajo régimen transitorio, mediante el movimiento de compuertas.

Se ha realizado la calibración de Canalflowmodel partiendo de unos casos académicos sencillo de flujo en un canal recto de sección trapezoidal, añadiendo posteriormente elementos de regulación primero en forma de compuertas transversales y después en forma de tomas laterales; para posteriormente simular diferentes casos de elevada complejidad tanto en pendiente como en variabilidad de la anchura de la sección como en la colocación de gran número de compuertas y tomas laterales. A su vez, se ha analizado la influencia de perturbaciones en el hidrograma de entrada atendiendo al valor pico y a la amplitud de los mismos. También se ha hecho un estudio de sensibilidad de los parámetros de regulación PID frente a diferentes situaciones para optimizar los cálculos y obtener resultados de una forma rápida, eficaz y fiable. Finalmente se ha aplicado todo lo anterior para simular un caso real.

Atendiendo a los resultados numéricos obtenidos de las simulaciones realizadas, podemos decir que Canalflowmodel es capaz de modelizar canales con cualquier tipo de geometría: sección rectangular, trapezoidal y a su vez contemplando la posibilidad de tener secciones variables. Se pueden introducir diferentes condiciones tanto iniciales como de contorno, incluyendo lecho seco; inclusive se puede cargar una condición de entrada mediante fichero. El método numérico es robusto y fiable, en todos los casos se aprecia que se cumple la conservación del volumen de agua y el cálculo siempre llega a su fin. Se ha comprobado que el sistema de control es estable frente a perturbaciones en la entrada tanto en valor máximo de pico como en amplitud de la perturbación arrojando buenos resultados. Canalflowmodel ofrece la posibilidad de introducir compuertas transversales y laterales, además de poder modificar los parámetros que regulan el controlador PID, que a su vez modifica la posición de las compuertas transversales. El análisis de sensibilidad de estos parámetros nos ha indicado que TI y TS se mueven en el mismo orden de magnitud y su influencia en los resultados es pequeña. TD se encuentra un orden de magnitud por encima de los anteriores y sus variaciones influyen más; y por último BM es cuatro órdenes de magnitud mayor y es el más sensible de los cuatro y por tanto, con el que hay que tener más cuidado a la hora de modificarlo ya que modifica por completo la simulación.

Se ha comprobado también como Canalflowmodel es capaz de simular casos complejos con pendientes del fondo fuerte y variación de la misma incluyendo un gran

número de compuertas transversales y tomas laterales. Los resultados numéricos se han comparado con medidas obtenidas de la bibliografía observando la gran similitud entre ellos corroborando el buen comportamiento del controlador PID en las compuertas transversales que garantizan los objetivos de la regulación. En la simulación del canal real de Pina de Ebro se han comparado los resultados obtenidos de la simulación numérica con los valores medidos durante el funcionamiento de las compuertas en un tramo temporal de 5 días. Se ha observado que la regulación podría haber mejorado el comportamiento real realizando una gestión más eficaz, evitando que el canal se vaciara y asegurando un suministro constante de caudal a las tomas laterales de riego para poder satisfacer a los regantes tanto en cantidad como en el instante de suministro.

En cuanto a la herramienta de cálculo podemos decir que Canalflowmodel tiene una entrada de datos fácil y dinámica. También permite introducir tiempo de simulación, de volcado de datos y de colocación de una sonda. La herramienta realiza con celeridad las simulaciones, presentando los resultados de forma visual, donde se puede realizar un primer análisis general. A su vez, se pueden visualizar los resultados de una forma temporal a lo largo de la simulación observando la propagación del flujo de agua en el canal, la apertura de las compuertas y los caudales. Como punto final permite la descarga de los resultados a fichero para poder analizar más minuciosamente la simulación realizada.

A pesar del buen funcionamiento de la herramienta hay dos aspectos que se pueden mejorar:

- Canalflowmodel permite introducir la geometría de las tomas laterales, anchura y apertura, pero no permite introducir un caudal de extracción deseado. Este aspecto permitiría introducir una variable más importante ya que en muchos casos, el caudal de extracción de las tomas laterales es el objetivo a conseguir.
- También se puede mejorar la eficacia del simulador introduciendo un regulador PID para cada compuerta transversal. Esto permitiría que cada compuerta transversal fuera controlada por un regulador independiente, pudiendo modificar los parámetros de cada regulador de forma separada.

Con todo lo expuesto anteriormente, se puede afirmar que la herramienta Canalflowmodel se comporta eficazmente ante cualquier tipo de flujo, y modalidad de control, logrando la estabilidad y la convergencia hacia los valores deseados de consigna.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [Chow, V. T., 1959] *Open-channel hydraulics*, McGraw-Hill, New York.
- [Clark I.F., 1972] *Automatic control of canals*, Proceedings of VIII Congress of ICID, Varna.
- [Clemmens et al., 1998] Clemmens A.J., Kacerek T.F., Grawitz B., Schuurmans J., *Test Cases for Canal Control Algorithms*, J. of Irrigation and Drainage Eng., ASCE, 124.
- [Clemmens A.J., Repogle J.A., 1989] *Control of Irrigation Canal Networks*, Journal of Irrigation and Drainage Eng. (ASCE), 115.
- [Goussard J., 1993] *Automation of Canal Irrigation Systems*, International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), New Delhi.
- [Traxco, 2010] *Historia ancestral del riego agrícola*, Traxco 2010.
- [Lacasta A. et al., 2014a] A. Lacasta, M. Morales-Hernández, P. Brufau y P. García-Navarro, *Simulation of PID control applied to irrigation channels*, Procedia Engineering, 70, 978-987.
- [Lacasta et al., 2014b] A. Lacasta, M. Morales-Hernández, P. Brufau y P. García-Navarro, *A simulation based optimal control system for water resources*, 11th International Conference on Hydroinformatics HIC 2014, New York City, USA.
- [Morales et al. 2013] M. Morales-Hernández, J. Murillo, and P. García-Navarro, *The formulation of internal boundary conditions in unsteady 2-d shallow water flows: application to flood regulation*, Water resources research, vol. 49, iss. 1, pp. 471-487.
- [Liria J., 2001] *Canales Hidráulicos. Proyecto, construcción, gestión y modernización*, Colegio Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.
- [Malaterre P.O., Rogers D.C., 1998] *Canal Control Algorithms*, Journal of Irrigation and Drainage Eng., ASCE, 124.
- [FAO, 2002] *Agua y cultivos* Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación Roma.
- [Soler i Guitart J., 2003] *Contribució a l'estudi del control de canals de reg per mitjà de mètodes numèrics de programació no lineal. Aplicació al càlcul de les trajectòries de referència*, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya.
- [SHI,-] *State Hydrological Institute (St.-Petersburg, Russia)*.

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1.1 Evolución del consumo de agua mundial según su uso: agricultura, industria, municipal, embalses. Fuente: State Hydrological Institute (St.-Petersburg, Russia) .....	8
Figura 1.2 Previsiones sobre la demanda de riego en las cuencas españolas en dos horizontes futuros a 10 y 20 años. Fuente: Libro Blanco del Agua .....	10
Figura 2.1 Acueducto de Segovia .....	12
Figura 6.1 Pantalla de acceso a la aplicación Canalfowmodel .....	22
Figura 7.1.1 Vista 3D del canal correspondiente al caso 3 y situación de la compuerta transversal .....	24
Figura 7.1.2 Hidrograma de entrada de caudal del caso 3 .....	25
Figura 7.1.3 Evolución temporal de la apertura de la compuerta para distintos picos de caudal del caso 3 .....	26
Figura 7.1.4 Evolución temporal de la apertura de la compuerta para distintas amplitudes del mismo pico de caudal del caso 3 .....	27
Figura 7.1.1.1 Sensibilidad de los parámetros de regulación del controlador PID de una compuerta transversal (Escala logarítmica).....	30
Figura 7.2.1 Perfil longitudinal en m del canal del Test 1 del caso 6.....	31
Figura 7.2.2 Hidrograma de entrada del Test1 del caso 6.....	32
Figura 7.2.3 Evolución temporal de la apertura de las compuerta transversales 1 a 7 (azul), del nivel superficial del agua en los tramos 1 a 7 (naranja) y de las alturas objetivo en los tramos 1 a 7 (gris) del Test 1 del caso 6.....	33
Figura 7.2.4 Evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales 1 a 8 del Test 1 del caso 6.....	34
Figura 7.2.5 Evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales de ASCE del Test 1 del caso 6 .....	35
Figura 7.3.1 Perfil longitudinal en m del canal del caso 8. Localización orientativa de las compuertas transversales (rojo) y tomas laterales (verde).....	35
Figura 7.3.2 Hidrograma de entrada del caso 8.....	36
Figura 7.3.3 Evolución temporal de la apertura de las compuerta transversales 1 a 4 (azul), del nivel superficial del agua en los tramos 1 a 4 (naranja) y de las alturas objetivo en los tramos 1 a 4 (gris) del caso 8.....	37
Figura 7.3.4 Evolución temporal del nivel superficial real (azul) y numérico (naranja) del agua en los tramos 1 al 4 del caso 8.....	39
Figura 7.3.5 Evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales del caso 8.....	39
Figura 7.3.6 Evolución temporal del caudal de salida real de las tomas laterales del caso 8 .....	40

### ANEXO I Canalfowmodel

Figura 1.1 Pantalla de acceso a la aplicación .....	55
---	----

Figura 1.2 Menús del programa Canalfowmodel.....	55
Figura 2.1.1 Definición del número de secciones y puntos.....	56
Figura 2.1.2 Definición de la posición de las secciones transversales.....	57
Figura 2.1.3 Definición de cada sección transversal.....	57
Figura 2.1.4 Definición del coeficiente de Manning y del calado mínimo .....	58
Figura 2.2 Definición de las condiciones iniciales.....	58
Figura 2.3.1 Definición de las condiciones de entrada.....	59
Figura 2.3.2 Definición de las condiciones de salida.....	60
Figura 2.4.1 Definición de los elementos de regulación.....	60
Figura 2.4.2 Parámetros de una compuerta lateral.....	61
Figura 2.5. Parámetros de una compuerta transversal.....	62
Figura 2.6.1 Parámetros de regulación PID.....	62
Figura 2.6.2 Parámetros numéricos de la simulación.....	63
Figura 2.6.3 Parámetros computacionales de la simulación.....	63
Figura 3.1 Evolución temporal durante el cálculo .....	64
Figura 4.1 Resultados de la simulación.....	66

## ANEXO II **Resultados numéricos de las simulaciones computacionales**

Figura 1.1.1 Vista 3D del canal correspondiente al caso 1 .....	71
Figura 1.1.2 Sección transversal del canal del caso 1 .....	71
Figura 1.3 Hidrograma de entrada del caso 1 .....	72
Figura 1.4 Caudal a lo largo del canal en T=12 h en el caso 1 .....	73
Figura 1.5 Nivel Superficial (azul) y cota del fondo (naranja) a lo largo del canal en T=12 h en el caso 1 .....	73
Figura 2.3 Hidrograma triangular de caudal de entrada del caso 2.....	75
Figura 2.4.1 Evolución temporal de los hidrogramas de caudal de entrada (azul) y salida (naranja) del caso 2.....	76
Figura 2.4.2 Nivel superficial a lo largo del canal en diferentes instantes de tiempo del caso 2.....	77
Figura 3.1.1 Vista 3D del canal correspondiente al caso 3.....	79
Figura 3.1.2 Sección transversal del canal del caso 3 .....	79
Figura 3.3 Hidrograma de entrada de caudal del caso 3.....	80
Figura 3.6.1 Evolución temporal de la apertura de la compuerta (azul), nivel superficial de agua (naranja) y altura objetivo (gris) del caso 3.....	82
Figura 3.6.2 Nivel superficial a lo largo del canal para diferentes instantes de tiempo del caso 3.....	83
Figura 3.6.3 Evolución temporal de los caudales de entrada (azul) y salida (naranja) del caso 3.....	84
Figura 3.6.4 Caudales a lo largo del canal en distintos instantes de tiempo del caso 3.....	84

Figura 3.7.1 Evolución temporal de la apertura de la compuerta para distintos picos de caudal del caso 3.....	85
Figura 3.7.2 Evolución temporal de la apertura de la compuerta para distintas amplitudes del mismo pico de caudal del caso 3.....	86
Figura 3.8 Sensibilidad de los parámetros de regulación del controlador PID de una compuerta transversal (Escala logarítmica).....	89
Figura 4.1 Vista 3D del canal correspondiente al caso 4.....	90
Figura 4.3 Hidrograma de entrada del caso 4.....	91
Figura 4.6.1 Evolución temporal de la apertura de las compuertas 1 (azul) y 2 (amarillo), del nivel superficial de agua antes de la compuerta 1 (naranja) y 2 (azul oscuro) y alturas objetivo de las compuertas 1 (gris) y 2 (verde) del caso 4.....	94
Figura 4.6.2 Perfiles de nivel superficial de agua a lo largo del canal en diferentes instantes de tiempo del caso 4.....	95
Figura 5.1 Vista 3D del canal correspondiente al caso 5.....	96
Figura 5.3 Hidrograma de entrada del caso 5.....	97
Figura 5.6.1 Evolución temporal de la apertura de las compuertas transversales 1 (azul) y 2 (amarillo), del nivel superficial del agua en los tramos del canal 1 (naranja) y 2 (azul oscuro) y alturas objetivo en los tramos del canal 1 (gris) y 2 (verde) del caso 5.....	100
Figura 5.6.2 Evolución temporal del caudal de salida de la toma lateral del caso 5.....	101
Figura 6.1.1.1 Perfil longitudinal en m del canal del Test 1 del caso 6.....	105
Figura 6.1.1.2 Sección transversal del canal del Test 1 del caso 6.....	105
Figura 6.1.3 Hidrograma de entrada del Test 1 del caso 6.....	107
Figura 6.1.6 Variación del caudal de extracción en las tomas laterales del Test 1 del caso 6.....	113
Figura 6.1.7.1 Evolución temporal del error de masa del Test 1 del caso 6.....	114
Figura 6.1.7.2 Evolución temporal de los caudales de entrada (azul) y salida (naranja) del Test 1 del caso 6.....	115
Figura 6.1.7.3 Perfil longitudinal del canal en T=0 s del Test 1 del caso 6.....	116
Figura 6.1.7.4 Perfil longitudinal del canal en T=7.000 s del Test 1 del caso 6.....	117
Figura 6.1.7.5 Perfil longitudinal de caudal en T=7.000 s del Test 1 del caso 6.....	118
Figura 6.1.7.6 Perfil longitudinal de caudal en T=34.000 s del Test 1 del caso 6.....	118
Figura 6.1.7.7 Perfil longitudinal de caudal en T=64.000 s del Test 1 del caso 6.....	119
Figura 6.1.7.8 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 1 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 1 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 1 (gris) del Test 1 del caso 6.....	120
Figura 6.1.7.9 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 2 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 2 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 2 (gris) del Test 1 del caso 6.....	120
Figura 6.1.7.10 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 3 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 3 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 3 (gris) del Test 1 del caso 6.....	121

Figura 6.1.7.11 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 4 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 4 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 4 (gris) del Test 1 del caso 6.....	121
Figura 6.1.7.12 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 5 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 5 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 5 (gris) del Test 1 del caso 6.....	122
Figura 6.1.7.13 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 6 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 6 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 6 (gris) del Test 1 del caso 6.....	122
Figura 6.1.7.14 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 7 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 7 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 7 (gris) del Test 1 del caso 6.....	123
Figura 6.1.7.15 Evolución temporal de la apertura de las tomas laterales del Test 1 del caso 6.....	124
Figura 6.1.7.16 Evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales 1, 2, 3 y 4 del Test 1 del caso 6.....	125
Figura 6.1.7.17 Evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales 5, 6, 7 y 8 del Test 1 del caso 6.....	126
Figura 6.1.7.18 Evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales de ASCE del Test 1 del caso 6.....	127
Figura 6.1.7.19 Evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales del Test 1 del caso 6.....	127
Figura 6.2.3 Hidrograma de entrada del Test 2 del caso 6.....	128
Figura 6.2.6 Variación del caudal de extracción en las tomas laterales del Test 2 del caso 6.....	132
Figura 6.2.7.1 Evolución temporal del error de masa del Test 2 del caso 6.....	133
Figura 6.2.7.2 Evolución temporal de los caudales de entrada (azul) y salida (naranja) del Test 2 del caso 6.....	134
Figura 6.2.7.3 Perfil longitudinal del canal en T=4.000 s del Test 2 del caso 6.....	135
Figura 6.2.7.4 Perfil longitudinal de caudal en T=4.000 s del Test 2 del caso 6.....	136
Figura 6.2.7.5 Perfil longitudinal de caudal en T=37.000 s del Test 2 del caso 6.....	136
Figura 6.2.7.6 Perfil longitudinal de caudal en T=85.000 s del Test 2 del caso 6.....	137
Figura 6.2.7.7 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 1 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 1 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 1 (gris) del Test 2 del caso 6.....	138
Figura 6.2.7.8 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 2 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 2 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 2 (gris) del Test 2 del caso 6.....	139
Figura 6.2.7.9 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 3 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 3 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 3 (gris) del Test 2 del caso 6.....	139

Figura 6.2.7.10 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 4 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 4 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 4 (gris) del Test 2 del caso 6.....	140
Figura 6.2.7.11 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 5 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 5 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 5 (gris) del Test 2 del caso 6.....	140
Figura 6.2.7.12 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 6 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 6 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 6 (gris) del Test 2 del caso 6.....	141
Figura 6.2.7.13 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 7 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 7 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 7 (gris) del Test 2 del caso 6.....	141
Figura 6.2.7.14 Evolución temporal de la apertura de las tomas laterales del Test 2 del caso 6.....	142
Figura 6.2.7.15 Evolución temporal del caudal de salida de la tomas laterales 1, 2, 3 y 4 del Test 2 del caso 6.....	143
Figura 6.2.7.16 Evolución temporal del caudal de salida de la tomas laterales 5, 6, 7 y 8 del Test 2 del caso 6.....	144
Figura 7.1.1.1 Perfil longitudinal en m del canal del Test 1 del caso 7.....	146
Figura 7.1.1.2 Sección transversal del canal del Test 1 del caso 7.....	146
Figura 7.1.3 Hidrograma de entrada del Test 1 del caso 7.....	148
Figura 7.1.6 Variación del caudal de extracción en las tomas laterales del Test 1 del caso 7.....	153
Figura 7.1.7.1 Evolución temporal del error de masa del Test 1 del caso 7.....	154
Figura 7.1.7.2 Evolución temporal de los caudales de entrada (azul) y salida (naranja) del Test 1 del caso 7.....	155
Figura 7.1.7.3 Perfil longitudinal del canal en T=0 s del Test 1 del caso 7.....	156
Figura 7.1.7.4 Perfil longitudinal del canal en T=30.000 s del Test 1 del caso 7.....	156
Figura 7.1.7.5 Perfil longitudinal de caudal en T=30.000 s del Test 1 del caso 7.....	157
Figura 7.1.7.6 Perfil longitudinal de caudal en T=70.000 s del Test 1 del caso 7.....	158
Figura 7.1.7.7 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 1 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 1 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 1 (gris) del Test 1 del caso 7.....	159
Figura 7.1.7.8 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 2 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 2 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 2 (gris) del Test 1 del caso 7.....	159
Figura 7.1.7.9 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 3 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 3 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 3 (gris) del Test 1 del caso 7.....	160



Figura 7.1.7.10 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 4 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 4 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 4 (gris) del Test 1 del caso 7.....	160
Figura 7.1.7.11 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 5 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 5 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 5 (gris) del Test 1 del caso 7.....	161
Figura 7.1.7.12 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 6 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 6 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 6 (gris) del Test 1 del caso 7.....	161
Figura 7.1.7.13 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 7 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 7 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 7 (gris) del Test 1 del caso 7.....	162
Figura 7.1.7.14 Evolución temporal de la apertura de las tomas laterales del Test 1 del caso 7.....	163
Figura 7.1.7.15 Evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales del Test 1.....	164
Figura 7.2.3 Hidrograma de entrada del Test 2 del caso 7.....	166
Figura 7.2.6 Variación del caudal de extracción en las tomas laterales del Test 2 del caso.....	169
Figura 7.2.7.1 Evolución temporal del error de masa del Test 2 del caso 7.....	170
Figura 7.2.7.2 Evolución temporal de los caudales de entrada (azul) y salida (naranja) del Test 2 del caso 7.....	171
Figura 7.2.7.3 Perfil longitudinal del canal en T=0 s del Test 2 del caso 7.....	172
Figura 7.2.7.4 Perfil longitudinal del canal en T=7.000 s del Test 2 del caso 7.....	172
Figura 7.2.7.5 Perfil longitudinal del canal en T=20.000 s del Test 2 del caso 7.....	173
Figura 7.2.7.6 Perfil longitudinal del canal en T=40.000 s del Test 2 del caso 7.....	173
Figura 7.2.7.7 Perfil longitudinal de caudal en T=40.000 s del Test 2 del caso 7.....	174
Figura 7.2.7.8 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 1 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 1 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 1 (gris) del Test 2 del caso 7.....	175
Figura 7.2.7.9 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 2 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 2 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 2 (gris) del Test 2 del caso 7.....	175
Figura 7.2.7.10 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 3 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 3 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 3 (gris) del Test 2 del caso 7.....	176
Figura 7.2.7.11 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 4 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 4 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 4 (gris) del Test 2 del caso 7.....	176

Figura 7.2.7.12 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 5 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 5 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 5 (gris) del Test 2 del caso 7.....	177
Figura 7.2.7.13 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 6 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 6 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 6 (gris) del Test 2 del caso 7.....	177
Figura 7.2.7.14 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 7 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 7 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 7 (gris) del Test 2 del caso 7.....	178
Figura 7.2.7.15 Evolución temporal de la apertura de las tomas laterales del Test 2 del caso 7.....	179
Figura 7.2.7.16 Evolución temporal del caudal de salida de la tomas laterales 1, 2, 3 y 4 del Test 2 del caso 7.....	180
Figura 7.2.7.17 Evolución temporal del caudal de salida de la tomas laterales 5, 6, 7 y 8 del Test 2 del caso 7.....	181
Figura 8.0.1 Vista en planta del primer tramo del canal de riego de Pina de Ebro.....	183
Figura 8.0.2 Vista en planta del segundo tramo del canal de riego de Pina de Ebro.....	184
Figura 8.0.3 Esquema en planta del canal de riego de Pina de Ebro con la localización de sus compuertas transversales y tomas laterales.....	184
Figura 8.1.1 Perfil longitudinal en m del canal del caso 8. Localización orientativa de las compuertas transversales (rojo) y tomas laterales (verde).....	185
Figura 8.1.2 Sección transversal del canal del caso 8.....	186
Figura 8.3 Hidrograma de entrada del caso 8.....	187
Figura 8.4 Compuerta transversal del canal de Pina de Ebro.....	188
Figura 8.6 Evolución temporal de la apertura de las tomas laterales del caso 8.....	194
Figura 8.7.1 Evolución temporal del error de masa del caso 8.....	195
Figura 8.7.2 Evolución temporal de los caudales de entrada (azul) y salida (naranja) del caso 8.....	196
Figura 8.7.3 Perfil longitudinal del canal en T=0 s del caso 8.....	196
Figura 8.7.4 Perfil longitudinal real del canal en T=0 s del caso 8.....	197
Figura 8.7.5 Perfil longitudinal del canal en T=200.000 s del caso 8.....	197
Figura 8.7.6 Perfil longitudinal de caudal en T=200.000 s del caso 8.....	198
Figura 8.7.7 Perfil longitudinal real de caudal en T=200.000 s del caso 8.....	198
Figura 8.7.8 Perfil longitudinal de caudal en T=230.000 s del caso 8.....	199
Figura 8.7.9 Perfil longitudinal real de caudal en T=230.000 s del caso 8.....	199
Figura 8.7.10 Perfil longitudinal del canal en T=321.000 s del caso 8.....	200
Figura 8.7.11 Perfil longitudinal real del canal en T=321.000 s del caso 8.....	200
Figura 8.7.12 Perfil longitudinal del canal en T=405.000 s del caso 8.....	201
Figura 8.7.13 Perfil longitudinal real del canal en T=405.000 s del caso 8.....	201
Figura 8.7.14 Perfil longitudinal de caudal en T=405.000 s del caso 8.....	202

Figura 8.7.15 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 1 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 1 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 1 (gris) del caso 8.....	203
Figura 8.7.16 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 2 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 2 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 2 (gris) del caso 8.....	204
Figura 8.7.17 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 3 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 3 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 3 (gris) del caso 8.....	204
Figura 8.7.18 Evolución temporal de la apertura de la compuerta transversal 4 (azul), del nivel superficial del agua en el tramo 4 (naranja) y de la altura objetivo en el tramo 4 (gris) del caso 8.....	205
Figura 8.7.19 Evolución temporal del nivel superficial real (azul) y numérico (naranja) del agua en el tramo 1 del caso 8.....	205
Figura 8.7.20 Evolución temporal del nivel superficial real (azul) y numérico (naranja) del agua en el tramo 2 del caso 8.....	206
Figura 8.7.21 Evolución temporal del nivel superficial real (azul) y numérico (naranja) del agua en el tramo 3 del caso 8.....	206
Figura 8.7.22 Evolución temporal del nivel superficial real (azul) y numérico (naranja) del agua en el tramo 4 del caso 8.....	206
Figura 8.7.23 Evolución temporal del caudal de salida de las tomas laterales del caso 8.....	207
Figura 8.7.24 Evolución temporal del caudal de salida real de las tomas laterales del caso 8.....	208

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1.1 Demandas de riego en España agrupadas por cuencas. Fuente: Libro Blanco del Agua .....	9
Tabla 3.1 Distribución de los recursos hídricos mundiales .....	14
Tabla 7.1.1.1 Valores óptimos del regulador PID para el caso 3 .....	29
Tabla 1.1 Datos geométricos del caso 1 .....	71
Tabla 1.2 Estado inicial del caso 1 .....	71
Tabla 1.3 Condición de salida del caso 1 .....	72
Tabla 2.1 Datos geométricos del caso 2 .....	74
Tabla 2.2 Estado inicial del caso 2 .....	74
Tabla 2.3 Condición de contorno de salida del caso 2 .....	75
Tabla 3.1 Datos geométricos del caso 3 .....	79
Tabla 3.2 Estado inicial del caso 3 .....	79
Tabla 3.3 Condición de salida de flujo del caso 3 .....	80
Tabla 3.4 Compuerta transversal de regulación automática del caso 3 .....	81
Tabla 3.5 Parámetros de regulación del controlador PID de la compuerta transversal del caso 3 .....	81
Tabla 3.8 Valores óptimos del regulador PID para el caso 3 .....	88
Tabla 4.1 Datos geométricos del caso 4 .....	90
Tabla 4.2 Estado inicial del caso 4 .....	91
Tabla 4.3 Condición de salida del caso 4 .....	91
Tabla 4.4 Datos de las compuertas transversales del caso 4 .....	92
Tabla 4.5 Parámetros de regulación del controlador PID de las compuertas transversales del caso 4 .....	92
Tabla 5.1 Datos geométricos del caso 5 .....	97
Tabla 5.2 Estado inicial del caso 5 .....	97
Tabla 5.3 Condición de salida del caso 5 .....	97
Tabla 5.4.1 Datos de las compuertas transversales del caso 5 .....	98
Tabla 5.4.2 Datos de la toma lateral del caso 5 .....	98
Tabla 5.5 Datos de la toma lateral del caso 5 .....	98
Tabla 5.6.1 Apertura máxima de las compuertas transversales 1 y 2 (en m) durante el estacionario en los casos 4 y 5 .....	99
Tabla 5.6.2 Apertura máxima de las compuertas transversales 1 y 2 (en m) durante el pico de caudal en los casos 4 y 5 .....	99
Tabla 6.1.1.1 Datos geométricos del Test 1 del caso 6 .....	104
Tabla 6.1.1.2 Datos geométricos de las secciones del Test 1 del caso 6 .....	106
Tabla 6.1.2 Estado inicial del Test 1 del caso 6 .....	106
Tabla 6.1.3 Condición de salida del Test 1 del caso 6 .....	107

Tabla 6.1.4.1 Compuertas transversales de regulación automática del Test 1 del caso 6	108
Tabla 6.1.4.2 Datos de las tomas laterales del Test 1 del caso 6	110
Tabla 6.1.4.3 Datos de la toma lateral número 8 del Test 1 del caso 6	111
Tabla 6.1.5 Parámetros de las compuertas transversales del Test 1 del caso 6	111
Tabla 6.1.6 Variación del caudal de extracción en las tomas laterales del Test 1 del caso 6	112
Tabla 6.2.2 Estado inicial del Test 2 del caso 6	128
Tabla 6.2.3.1 Condición de salida del Test 2 del caso 6	129
Tabla 6.2.3.2 Condición de salida del Test 2 del caso 6	129
Tabla 6.2.4.1 Datos de las tomas laterales del Test 2 del caso 6	131
Tabla 6.2.5 Parámetros de las compuertas transversales del Test 2 del caso 6	131
Tabla 6.2.6 Variación del caudal de extracción en las tomas laterales del Test 2 del caso 6	132
Tabla 7.1.1.1 Datos geométricos del Test 1 del caso 7	145
Tabla 7.1.1.2 Datos geométricos de las secciones del Test 1 del caso 7	147
Tabla 7.1.2 Estado inicial del Test 1 del caso 7	147
Tabla 7.1.3 Condición de salida del Test 1 del caso 7	148
Tabla 7.1.4.1 Compuertas transversales de regulación automática del Test 1 del caso 7	150
Tabla 7.1.4.2 Datos de las tomas laterales del Test 1 del caso 7	151
Tabla 7.1.5 Parámetros de las compuertas transversales del Test 1 del caso 7	151
Tabla 7.1.6 Variación del caudal de extracción en las tomas laterales del Test 1 del caso 7	152
Tabla 7.2.2 Estado inicial del Test 2 del caso 7	165
Tabla 7.2.3 Condición de salida del Test 2 del caso 7	166
Tabla 7.2.4.1 Datos de las tomas laterales del Test 2 del caso 7	168
Tabla 7.2.5 Parámetros de las compuertas transversales del Test 2 del caso 7	168
Tabla 7.2.6 Variación del caudal de extracción en las tomas laterales del Test 2 del caso 7	169
Tabla 8.1 Datos geométricos del caso 8	185
Tabla 8.2 Estado inicial del caso 8	186
Tabla 8.3 Condición de salida del caso 8	187
Tabla 8.4.1 Compuertas transversales de regulación automática del caso 8	189
Tabla 8.4.2 Datos de las tomas laterales del caso 8	192
Tabla 8.5 Parámetros de las compuertas transversales del caso 8	193